

(19) Japan Patent Office (JP)

(12) Publication of Patent Application (A)

(11) Publication Number of Patent Application: 2002-202221

(43) Date of Publication of Application: July 19, 2002

(51) Int. Cl.⁷: Domestic Classification Symbol

G01M 11/02

G01B 11/00

G03F 7/22

H01L 21/027

FI:

G01M 11/02 B

G01B 11/00 H

G03F 7/22 H

H01L 21/30 516 A

Theme Code (reference): 2F065

2G086

5F046

F Term (reference): 2F065 AA03 AA17 CC17 CC21 DD03

DD06 FF04 FF26 FF52 GG04

HH03 JJ03 JJ26 LL03 LL07

LL10 LL20 LL25 LL59 MM03

PP12 QQ18 QQ24 QQ42 QQ43

QQ45 TT02 UU05 UU07

2G086 HH06

5F046 AA25 BA04 BA05 CB12 CB17

CB25 CC01 CC03 CC05 CC15

DA13 DA14 DB01 DB11 DC12

Request for Examination: Not made

Number of Claims: 24 OL (24 pages in total)

(21) Application Number: 2000-400851

(22) Application Date: December 28, 2000

(71) Applicant: 000004112

Nikon Corporation

2-3, Marunouchi 3-chome, Chiyoda-ku, Tokyo

(72) Inventor: Ikusou Shiyu

c/o Nikon Corporation

2-3, Marunouchi 3-chome, Chiyoda-ku, Tokyo

(72) Inventor: Toru Fujii

c/o Nikon Corporation

2-3, Marunouchi 3-chome, Chiyoda-ku, Tokyo

(74) Agent: 100102901

Patent Attorney, Atsushi Tateishi

[54] [Title of the Invention] POSITION-DETECTING METHOD AND
DEVICE, OPTICAL-CHARACTERISTIC MEASURING METHOD AND
INSTRUMENT, LITHOGRAPHIC PRINTER AND DEVICE-MANUFACTURING
METHOD

[57] [Abstract]

[Abstract]

[Problem] To detect a position of a spot image with accuracy.

[Means for Resolution] An analytic data distribution is prepared from an imaging result (step 122) and a number is determined that includes odd and even numbers defining an analytic width as to the analytic data distribution (step 123). Subsequently, a first estimated position is determined by the analysis with a predetermined algorism concerning the analytic data distribution based on the analytic width defined by the determined odd number, and a second estimated position is determined by the analysis with a predetermined algorism concerning the analytic data distribution based on the analytic width defined by the determined even number (step 124). Then, a spot image position is detected depending upon the first and second estimated positions and the nature of the predetermined algorism (step 125).

[Claims]

[Claim 1]

A position detecting method that detects a position of a spot image taken, the method comprising:

a first step of preparing an analytic data distribution from pixel data the spot is taken an image;

a second step of determining a plurality of numbers including a first number that is an odd number and a second number that is an even number, as numbers defining an analytic width concerning the analytic data distribution, for use in detecting a position of the spot image with respect to a predetermined direction;

a third step of determining at least one first estimated position of the spot image with respect to the predetermined direction on each of odd numbers in the plurality of numbers, depending upon data of pixel positions in the odd number arranged in the predetermined direction about a first pixel position assuming a maximum value in the analytic data distribution;

a fourth step of determining at least one second estimated position of the spot image with respect to the predetermined direction on each of even numbers in the plurality of numbers, depending upon data of pixel positions in an even number arranged in the predetermined direction about a boundary between the first pixel position and a second pixel

position assuming a greater data value within two pixel positions adjacent the first pixel position with respect to the predetermined direction in the analytic data distribution; and

a fifth step of determining a position of the spot image with respect to the predetermined direction, depending upon the first and second estimated positions.

[Claim 2]

A position detecting method according to claim 1, wherein the analytic data distribution is a data distribution obtained by taking a sum over a plurality of pixel strings that are along the predetermined direction different in position concerning a direction orthogonal to the predetermined direction.

[Claim 3]

A position detecting method according to claim 2, wherein the plurality of numbers are each equal to or smaller than a maximum number of numbers which pixel data equal to or greater than a predetermined value is arranged successively along the predetermined direction in a pixel data distribution of the spot image.

[Claim 4]

A position detecting method according to claim 1, wherein the analytic data distribution is a data distribution obtained by taking a sum over a plurality of pixel strings in the predetermined direction different in a position concerning a

direction orthogonal to the predetermined direction, as to pixel data equal to or greater than a predetermined value.

[Claim 5]

A position detecting method according to claim 4, wherein the plurality of numbers are each equal to or smaller than a maximum number of numbers which pixel data equal to or greater than the predetermined value is arranged successively in a predetermined direction in the image data distribution of spot images.

[Claim 6]

A position detecting method according to claim 3 or 5, wherein the first number is an odd number most approximate to the maximum number while the second number is an even number most approximate to the maximum number.

[Claim 7]

A position detecting method according to any one of claims 1 to 6, wherein the plurality of numbers are one odd number and one even number.

[Claim 8]

A position detecting method according to claim 7, wherein, in the fifth step, a position minimal in estimated error is determined as a position of the spot image with respect to a predetermined direction among the first and second estimated positions and an average position over the first and second estimated positions.

[Claim 9]

A position detecting method according to claim 7, wherein, in the fifth step, a position of the spot image with respect to a predetermined direction is determined by determining a weighted average over the first and second estimated positions.

[Claim 10]

A position detecting method according to claim 1, wherein the analytic data distribution is a discrete column data distribution concerning a pixel string along at least one predetermined direction,

the plurality of numbers being determined on each discrete column data distribution,

in the fifth step, a position of the spot image with respect to the predetermined direction depending upon the first and second estimated positions being determined on each of the discrete column data distributions.

[Claim 11]

A position detecting method according to claim 10, wherein the plurality of numbers, concerning respective discrete column data distributions, are each equal to or smaller than a number of arrangement which pixel data equal to or greater than a predetermined value are arranged successively along the predetermined direction in each of the discrete column data distributions.

[Claim 12]

A position detecting method according to claim 11, wherein the first number is an odd number most approximate to the number of arrangement while the second number is an even number most approximate to the number of arrangement.

[Claim 13]

A position detecting method according to any one of claims 10 to 12, wherein the plurality of numbers are one odd number and one even number.

[Claim 14]

A position detecting method according to any one of claims 10 to 13, wherein the fifth step includes a sixth step of determining a discrete estimated position in each of the discrete column data distributions depending upon the first and second estimated positions in each of the discrete column data distributions, and a seven step of determining a position of the spot image with respect to the predetermined direction in each of the discrete column data distributions.

[Claim 15]

A position detecting method according to claim 14, wherein the seventh step determines a position of the spot image with respect to the predetermined direction by determining a weighted mean over the discrete estimated value in accordance with a statistic reliability on each of the discrete estimated values.

[Claim 16]

A position detecting method according to any one of claims 1 to 15, wherein the estimated position is calculated by a center-of-gravity method.

[Claim 17]

A position detecting device that detects a position of a spot imaging, the position detecting device comprising:

a preparing device that prepares an analytic data distribution from pixel data of the spot image taken;

a determining device that determines a plurality of numbers including a first number that is an odd number and a second number that is an even number, as numbers defining an analytic width concerning the analytic data distribution, for use in detecting a position of the spot image with respect to a predetermined direction;

an estimated-position calculating device that calculates at least one first estimated position of the spot image with respect to the predetermined direction on each of odd numbers in the plurality of numbers, depending upon data of pixel positions in the odd number arranged in the predetermined direction about a first pixel position assuming a maximum value in the analytic data distribution, and at least one second estimated position of the spot image with respect to the predetermined direction on each of even numbers in the plurality of numbers, depending upon data of pixel positions

in an even number arranged in the predetermined direction about a boundary between the first pixel position and a second pixel position assuming a greater data value within two pixel positions adjacent to the first pixel position in the predetermined direction in the analytic data distribution, on each of even numbers of among the plurality of numbers; and

a spot-position calculating device that a position of the spot image with respect to the predetermined direction, depending upon the first and second estimated positions.

[Claim 18]

An optical-characteristic measuring method that measures an optical characteristic of a detecting optical system, comprising:

an image forming step of wavefront-splitting light passed through the detecting optical system and forming a plurality of spot images;

an imaging step of taking a plurality of spot images;

a position detecting step of detecting positions of the plurality of spot images taken in the imaging step by using a position detecting method according to any one of claims 1 to 16; and

an optical-characteristic calculating step of calculating an optical characteristic of the detecting optical system depending upon the positions of the plurality of spot images detected in the position detecting step.

[Claim 19]

An optical-characteristic measuring method according to claim 18, wherein the optical characteristic is a wavefront aberration.

[Claim 20]

An optical-characteristic measuring instrument that measures an optical characteristic of a detecting optical system, comprising:

a wavefront splitter that wavefront-splits light passed through the detecting optical system is wavefront-split and forms a plurality of spot images;

an imaging device that takes a plurality of spot images;

a position detecting device that detects positions of the plurality of spot images taken by the imaging device, according to claim 17; and

an optical-characteristic calculating device that calculates an optical characteristic of the detecting optical system depending upon the positions of the plurality of spot images detected by the position detecting device.

[Claim 21]

An optical-characteristic measuring instrument according to claim 20, wherein the wavefront splitter is a microlens array arranged with lens elements two-dimensionally.

[Claim 22]

A lithographic printer that transfers a predetermined pattern onto a substrate by illuminating exposure light to the substrate, the lithographic printer comprising:

a printer body having a projection optical system arranged on an optical path of exposure light; and

an optical-characteristic measuring instrument according to claim 20 or 21.

[Claim 23]

A lithographic printer according to claim 22, wherein the optical-characteristic measuring instrument is removable from the lithographic printer.

[Claim 24]

A device-manufacturing method including a lithography step, wherein the lithography step performs printing by use of the lithographic printer according to claim 22 or 23.

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Technical Field to Which the Invention Belongs]

The present invention relates to a position-detecting method and device, optical-characteristic measuring method and instrument, lithographic printer and device-manufacturing method, and more particularly to a position-detecting method and device that detects a position of a spot image formed by a predetermined optical system, an optical-characteristic measuring method and instrument that measures an optical

characteristic of a detecting optical system by use of such position detecting method, a lithographic printer having such an optical-characteristic measuring instrument, and a device-manufacturing method using the lithographic printer.

[0002]

[Prior Art]

In the lithography to manufacture a semiconductor device, a liquid-crystal display device or the like, a lithographic printer is conventionally used to transfer the pattern (hereinafter, referred also to as a "reticle pattern") formed on a mask or reticle (hereinafter, referred generally to as a "mask") onto a substrate, such as a wafer or a glass plate (hereinafter, appropriately referred generally to as a "substrate"), applied with resist, etc. through a projection optical system. Such a lithographic printer mainly uses a stationary type lithographic printer, e.g. so-called a stepper, or a scanning type lithographic printer, e.g. so-called a scanning stepper.

[0003]

The lithographic printer is required to project the pattern formed on the reticle onto a substrate with resolution and fidelity. For this reason, the projection optical system is designed to have a well optical characteristic that aberrations are fully suppressed.

[0004]

However, there is a difficulty in making up the projection optical system perfectly as design. On the projection optical system actually produced, there remain aberrations resulting from a variety of factors. Therefore, the projection optical system in actual production has an optical characteristic that is different from the optical characteristic in design.

[0005]

In this situation, various techniques are proposed to measure an optical characteristic, such as aberration, in such a detecting optical system as a projection optical system actually fabricated. Of among the various proposals of techniques, a spherical wave caused using a pinhole is incident upon the detecting optical system. The pinhole image passed the detecting optical system is once converted into collimated light whose wavefront is split into a plurality. A spot image is formed on each split part of the wavefront, to measure a wavefront aberration through the detecting optical system depending upon a forming position of the spot image on each divisional wavefront, to which wavefront-aberration measuring technique an attention has been drawn.

[0006]

Such a wavefront-aberration measuring instrument can be easily constructed by employing, say, a microlens array arranged with a multiplicity of small lenses along the

two-dimensional plane parallel with the ideal wavefront of collimated light, as a wavefront splitter for dividing the wavefront of incident light and forming spot images on the split-wavefront basis. The multiplicity of spot images formed by the microlens array are taken by an imaging device, such as CCDs, to detect a spot image position by determining a center-of-gravity of spot-image waveforms by the center-of-gravity method or by determining the maximal correlated position of the spot images to a template waveform through correlational method. Thus, a wavefront aberration is determined from the deviations of the detected spot-image positions relative to the design position.

[0007]

[Problem that the Invention is to Solve]

The center-of-gravity and correlational methods, employed in the prior art, are highly resistive to noise and excellent methods in a general sense. However, those are not necessarily effective where to detect spot-image positions with a small number of pixels (effective number of pixels of 5 (in the row direction) by 5 (in the column direction) and at an accuracy by far smaller (e.g. at an accuracy of approximately $1/100 - 1/1000$ of pixel size) than the pixel size.

[0008]

Namely, in the conventional center-of-gravity method, spot positions on principle could not be detected at a desired

accuracy. Meanwhile, in the correlational method, positional detection is not available with swiftness because of the need to make a correlated operation to a number (approximately $100 \times 100 - 1000 \times 1000$) of template waveforms.

[0009]

However, from the request of improving the printing accuracy together with the recent increase of integration, there is desired to detect a spot-image position at a precision by far smaller than the pixel size through a smaller number of pixels in the spot image, in measuring a wavefront aberration as to a projection optical system.

[0010]

The present invention has been made under the circumstances. It is a first object to provide a position detecting method and device capable of detecting a spot image position with swiftness and accuracy even where there is a small number of pixels in a spot image.

[0011]

A second object of the invention is to provide an optical-characteristic measuring method and instrument capable of measuring an optical characteristic of a measuring optical system.

[0012]

A third object of the invention is to provide a lithographic printer capable of transferring a predetermined

pattern onto a substrate with accuracy.

[0013]

A fourth object of the invention is to provide a device-manufacturing method capable of producing a highly integrated device having a precise pattern.

[0014]

[Means for Solving the Problem]

According to the findings the present inventor obtained from the result of study, in case an algorism such as a center-of-gravity method is used where there are small number of pixels in a spot image taken, spot image position can be detected with accuracy if taking the number of pixels-to-use odd in a predetermined direction when the spot image position is around a center of pixels in a predetermined direction. Meanwhile, when the spot image position is around a side edge in a predetermined direction of pixels, in case the number of pixels-to-use in a predetermined direction is even, spot image position can be detected with high accuracy. However, in other spot image positions, the accuracy of positional detection lowers even if the number of pixels is taken as an odd number or an even number. The lowering manner the accuracy of positional detection exhibits various forms depending upon a position detecting algorism employed. For example, in the case of center-of-gravity method, whether error takes place on the positive side or on the positive side depends upon the

number of pixels used in the center-of-gravity method as an algorithm employed, taken as an odd number or as an even number.

[0015]

Namely, a position detecting method in the invention is a position detecting method that detects a position of a spot taken an image, the method comprising: a first step of preparing an analytic data distribution from pixel data of the spot image taken; a second step of determining a plurality of numbers including a first number that is an odd number and a second number that is an even number, as numbers defining an analytic width concerning the analytic data distribution, for use in detecting a position of the spot image with respect to a predetermined direction; a third step of determining at least one first estimated position of the spot image with respect to the predetermined direction on each of odd numbers in the plurality of numbers, depending upon data of pixel positions in the odd number arranged in the predetermined direction about a first pixel position assuming a maximum value in the analytic data distribution; a fourth step of determining at least one second estimated position of the spot image with respect to the predetermined direction on each of even numbers in the plurality of numbers, depending upon data of pixel positions in an even number arranged in the predetermined direction about a boundary between the first pixel position and a second pixel position assuming a greater data value within two pixel

positions adjacent the first pixel position with respect to the predetermined direction in the analytic data distribution; and a fifth step of determining a position of the spot image with respect to the predetermined direction, depending upon the first and second estimated positions. Here, the "spot" includes a circular spot, an elliptic spot and a rectangular spot. In the present specification, the term "spot" is used in such meaning.

[0016]

Due to this, based on an analytic data distribution formed from an imaging result at the first step and a plurality of numbers including a first number (odd number) and a second number (even number) that are determined at the second step, a first estimated position is determined as to at least one odd number of among a plurality of numbers at the third step by a predetermined algorithm, e.g. center-of-gravity method. Meanwhile, a second estimated position is determined as to at least one even number of among a plurality of numbers at the fourth step by the predetermined algorithm. At the fifth step, a position of the spot image in a predetermined direction is determined based on the first and second estimated values while taking account of the nature of the predetermined algorithm used in determining the first and second estimated values.

[0017]

Accordingly, even where there is a small number of pixels

in the spot image, spot image position can be detected with swiftness and accuracy.

[0018]

In a position detecting method of the invention, the analytic data distribution is provided as (a) a data distribution obtained by taking a sum over a plurality of pixel strings that are along the predetermined direction different in position concerning a direction orthogonal to the predetermined direction or (b) a data distribution obtained by taking a sum over a plurality of pixel strings in the predetermined direction different in a position concerning a direction orthogonal to the predetermined direction, as to pixel data equal to or greater than a predetermined value. Here, "taking a sum over pixel strings along a plurality of predetermined directions" means to make a data string along a predetermined direction by taking a sum over pixel data as to the pixels equal in pixel position in the predetermined direction in the pixel string along a plurality of predetermined directions.

[0019]

In this case, the plurality of numbers each can be provided equal to or smaller than a maximum number of numbers which pixel data equal to or greater than a predetermined value is arranged successively along the predetermined direction in a pixel data distribution of the spot image. The first number

can be an odd number most approximate to the maximum number while the second number be an even number most approximate to the maximum number.

[0020]

Meanwhile, in the position detecting method of the invention, the plurality of numbers can be one odd number and one even number.

[0021]

In this case, in the fifth step, (a) a position minimal in estimated error can be determined as a position of the spot image with respect to a predetermined direction of among the first and second estimated positions and an average position over the first and second estimated positions. Meanwhile, a position of the spot image with respect to a predetermined direction can be determined by determining a weighted average over the first and second estimated positions.

[0022]

Meanwhile, in a position detecting method of the invention, the analytic data distribution can be a discrete column data distribution concerning a pixel string along at least one predetermined direction, the plurality of numbers being determined on each of the discrete column data distributions, in the fifth step, a position of the spot image with respect to the predetermined direction depending upon the first and second estimated positions being determined on each

of the discrete column data distributions.

[0023]

Here, the plurality of numbers, concerning respective discrete column data distributions, each can be equal to or smaller than a number of arrangement which pixel data equal to or greater than a predetermined value are arranged successively along the predetermined direction in each of the discrete column data distributions. The first number can be an odd number most approximate to the number of arrangement while the second number be an even number most approximate to the number of arrangement.

[0024]

Meanwhile, in the case of analyzing a discrete row data distribution, the fifth step can include a sixth step of determining a discrete estimated position in each of the discrete column data distributions depending upon the first and second estimated positions in each of the discrete column data distributions, and a seven step of determining a position of the spot image with respect to the predetermined direction in each of the discrete column data distributions.

[0025]

Here, in the seventh step a position of the spot image with respect to the predetermined direction can be determined by determining a weighted mean over the discrete estimated value in accordance with a statistic reliability on each of

the discrete estimated values.

[0026]

A position detecting device in the invention is a position detecting device that detects a position of a spot image taken, the position detecting device comprising: a preparing device (34) that prepares an analytic data distribution from pixel data of the spot image taken; a determining device (35) that determines a plurality of numbers including a first number that is an odd number and a second number that is an even number, as numbers defining an analytic width concerning the analytic data distribution, for use in detecting a position of the spot image with respect to a predetermined direction; an estimated-position calculating device (36) that calculates at least one first estimated position of the spot image with respect to the predetermined direction on each of even numbers in the plurality of numbers, depending upon data of pixel positions in the odd number arranged in the predetermined direction about a first pixel position assuming a maximum value in the analytic data distribution, and at least one second estimated position of the spot image with respect to the predetermined direction on each of odd numbers in the plurality of numbers, depending upon data of pixel positions in an even number arranged in the predetermined direction about a boundary between the first pixel position and a second pixel position assuming a greater

value within two pixel positions adjacent to the first pixel position in the predetermined direction in the analytic data distribution, on each of even numbers of among the plurality of numbers; and a spot-position calculating device (37) that a position of the spot image with respect to the predetermined direction, depending upon the first and second estimated positions.

[0027]

Due to this, based on an analytic data distribution formed from the result of imaging of the imaging device and a plurality of numbers including a first number (odd number) and a second number (even number) that are determined by the determining device, the estimated position calculating device determines first and second estimated positions a predetermined algorithm, e.g. center-of-gravity method. The spot-position calculating device determines a spot image position depending on the first and second estimated values with respect to the predetermined direction while taking account of the nature of the predetermined algorithm used in determining the first and second estimated values. Namely, spot image position is detected by using the position detecting method of the invention. Accordingly, even where there are a small number of pixels in a spot image, spot image position can be detected with swiftness and accuracy.

[0028]

An optical-characteristic measuring method is an optical-characteristic measuring method that measures an optical characteristic of a detecting optical system, comprising: an image forming step of wavefront-splitting light passed through the detecting optical system and forming a plurality of spot images; an imaging step of taking a plurality of spot images; a position detecting step of detecting positions of the plurality of spot images taken in the imaging step by using a position detecting method of the invention; and an optical-characteristic calculating step of calculating an optical characteristic of the detecting optical system depending upon the positions of the plurality of spot images detected in the position detecting step.

[0029]

Due to this, the respective positions of a plurality of spot images, formed at an image plane in the image forming step and taken in the imaging step, are detected with accuracy in the position detecting step by the position detecting method of the invention. Based on the positions of a plurality of patterns, an optical characteristic of the detecting optical system is calculated in the optical-characteristic calculating step. Accordingly, the optical characteristic of the detecting optical system can be measured with accuracy.

[0030]

Incidentally, in the optical-characteristic measuring

method of the invention, the optical characteristic can be provided as a wavefront aberration.

[0031]

An optical-characteristic measuring instrument in the invention is an optical-characteristic measuring instrument that measures an optical characteristic of a detecting optical system (PL), comprising: a wavefront splitter (94) that wavefront-splits light passed through the detecting optical system is wavefront-split and forms a plurality of spot images; an imaging device (95) that takes a plurality of spot images; a position detecting device (32) of the invention that detects positions of the plurality of spot images taken by the imaging device; and an optical-characteristic calculating device (33) that calculates an optical characteristic of the detecting optical system depending upon the positions of the plurality of spot images detected by the position detecting device.

[0032]

Due to this, a plurality of spot images formed by the wavefront splitter are taken by the imaging device. Subsequently, the positions of a plurality of spot images are detected with accuracy from the result of imaging by the position detecting device using the position detecting method of the invention. Then, the optical-characteristic calculating device calculates an optical characteristic of the detecting optical system depending upon the detected positions

of the plurality of spot images. Namely, the optical-characteristic measuring instrument measures the optical characteristic of the detecting optical system by the optical-characteristic measuring method of the invention. Accordingly, the optical characteristic of the detecting optical system can be measured with accuracy.

[0033]

In the optical-characteristic measuring instrument of the invention, the wavefront splitter can be a microlens array (94) arranged with lens elements (94a) two-dimensionally.

[0034]

A lithographic printer in the invention is a lithographic printer that transfers a predetermined pattern onto a substrate (W) by illuminating exposure light to the substrate, the lithographic printer comprising: a printer proper (60) having a projection optical system (PL) arranged on an optical path of exposure light; and an optical-characteristic measuring instrument of the invention having the projection optical system as the detecting optical system.

[0035]

Due to this, the optical characteristic is measured with accuracy by the optical-characteristic measuring instrument of the invention. By using the projection optical system ensured that the optical characteristic is adjusted well, a predetermined pattern can be transferred to the substrate.

Accordingly, the predetermined pattern can be accurately transferred to the substrate.

[0036]

In the lithographic printer of the invention, the optical-characteristic measuring instrument can be arranged removable from the lithographic printer.

[0037]

A device-manufacturing method in the invention is a device-manufacturing method including a lithography step, wherein the lithography step is to perform printing by use of the lithographic printer of the invention. Due to this, by performing printing by use of the lithographic printer of the invention, a predetermined pattern can be accurately transferred to segmented area, thus improving the productivity of a highly integrated device having a precise pattern.

[0038]

[Mode for Carrying Out the Invention]

First Embodiment

A first embodiment of the present invention will be explained below with reference to Figs. 1 - 15.

[0039]

Fig. 1 shows a schematic arrangement of a lithographic printer 100 according to an embodiment of the invention. The lithographic printer 100 is a step-and-scan schemed projection lithographic printer. The lithographic printer 100 has a

printer proper 60 and a wavefront-aberration measuring instrument 70 serving as an optical-characteristic measuring instrument.

[0040]

The printer proper 60 has an illumination system 10, a reticle stage RST for sustaining a reticle R thereon, a projection optical system PL serving as a detecting optical system, a wafer stage WST serving as a stage device on which a wafer W is to be rested, an alignment microscope AS, a stage control system 19 taking control of the location and position of the reticle stage RST and wafer stage WST, a main control system 20 taking total control of the apparatus overall, and so on.

[0041]

The illumination system 10 includes a light source, an illuminance-uniformizing optical system formed by a fly's-eye lens, etc., a relay lens, a variable ND filter, a reticle blind and a dichroic mirror (none shown). The structure of the illumination system like this is disclosed, say, in JP-A-H10-112433. In the illumination system 10, illumination is made with light IL at a nearly uniform illuminance to an illumination area in a slit form defined by a reticle blind, over a reticle R, rendered with a circuit pattern, etc.

[0042]

The reticle R is fixed on the reticle stage RST, say,

by vacuum clamp. The reticle stage RST, herein, is to be driven slightly on the XY plane vertical to the optical axis (coincident with the optical axis AX of a projection optical system PL, referred later) of the illumination system 10 and driven at a scanning rate designated in a predetermined scanning direction (assumed in a Y-direction, herein), by means of a not-shown reticle-stage drive section made by a two-dimensional linear actuator of a magnetic float type. Furthermore, in this embodiment, because the magnetic float type two-dimensional linear actuator includes an on-Z-axis driving coil besides on-X-axis and on-Y-axis driving coils, slight drive is available also in the Z direction.

[0043]

The reticle stage RST, on a stage movement plane, is detected in position at all times at a resolution, say, of approximately 0.5 - 1 nm by a reticle laser interferometer (hereinafter, referred to as a "reticle interferometer") 16 through a movement mirror 15. The reticle-stage RST positional information (or speed information), of from the reticle interferometer 16, is sent to the main control system 20 through the stage control system 19. Based on the positional information (or speed information), the main control system 20 drives the reticle stage RST through the stage control system 19 and reticle-stage drive section (not shown).

[0044]

The projection optical system PL is arranged below the reticle stage RST in Fig. 1, whose optical axis AX is taken as in the X direction. The projection optical system PL is, say, a reduction system telecentric at both sides and made up by a plurality of not-shown lens elements having a common optical axis AX in the Z-axis direction. The projection optical system PL uses a projection magnification β of 1/4, 1/5 or 1/6, for example. Accordingly, when the illumination area on the reticle R is illuminated with illumination light (radiation) IL, the pattern formed on the reticle R is reduced at a projection magnification of β by the projection optical system PL into an image (partially inverted image), and projected and transferred to a slit-like exposure area on the wafer W applied with resist (photosensitive agent) on the surface thereof.

[0045]

Incidentally, in the embodiment, particular ones (e.g. predetermined five) of among the plurality of lens elements are arranged movable independently one from another. Those lens elements are moved by means of drive elements, such as three piezoelectric elements respectively provided for the particular lenses, supporting a lens support member supporting the particular lens elements and coupled to a barrel. Namely, the particular lens elements can be parallel-moved independently along the optical axis AX in accordance with a

displacement amount of the drive element, and be given a desired inclination relative to a plane vertical to the optical axis AX. The drive instruction signal, to be provided to the drive elements, is under control of the focus-characteristic correction controller 51, according to a command MCD of from the main control system 20. This places the drive elements under control in their displacement amounts.

[0046]

In the projection optical system PL thus structured, optical characteristics, such as distortion, curvature-of-field, astigmatism, comma aberration or spherical aberration, can be adjusted by controlling the movement of the lens element by means of the main control system 20 through the focus-characteristic correction controller 51.

[0047]

The wafer stage WST is arranged on a not-shown base, below the projection optical system PL in Fig. 1. A wafer holder 25 is rested upon the wafer stage WST. The wafer W is fixed on the wafer holder 25, say, by vacuum clamp. The wafer holder 25 is structured to incline in a desired direction relative to the surface, orthogonal to the optical axis, of the projection optical system PL and to move slightly also in the direction of the optical axis AX (Z direction) of the projection optical system PL. Meanwhile, the wafer holder 25 is also rotatable slightly about the optical axis AX.

[0048]

Meanwhile, a bracket structure is formed on the wafer stage WST at its +Y-directional side, to removably mount a wavefront sensor 90, referred later.

[0049]

The wafer stage WST is structured to move not only in a scanning direction (Y direction) but also in a direction vertical to the scanning direction (X direction) such that a plurality of shot areas on the wafer W can be moved to an exposure area conjugate to the illumination area. Thus, step-and-scan operation is performed with a repetition of the scanning printing operation over the shot areas on the wafer W and the movement operation of up to the next-printing start position. The wafer stage WST is to be driven XY two-dimensionally by the wafer-stage drive section 24 including a motor.

[0050]

The wafer stage WST is detected, in position on the XY plane, at a resolution, say, of approximately 0.5 - 1 nm at all times by means of the wafer laser interferometer (hereinafter, referred to as a "wafer interferometer") 18 through the movement mirror 17. The positional information (or speed information) of the wafer stage WST is sent to the main control system 20 through the stage control system 19. The main control system 20 takes drive control of the wafer

stage WST through the stage control section 19 and wafer-stage drive section 24, on the basis of the positional information.

[0051]

The alignment microscope AS is arranged laterally of the projection optical system PL. The embodiment uses an off-axis-schemed microscope made with a focal-alignment sensor to observe a street line or position-detecting mark (fine alignment mark) formed on the wafer W. The detail structure of the alignment microscope AS is disclosed, say, in JP-A-H9-219354. The observation result by the alignment microscope AS is supplied to the main control system 20.

[0052]

Furthermore, in Fig. 1 apparatus, a multi-point focal position detecting system (21, 22) is provided that is one of an oblique-incident type focus detecting system (focus detecting system) to detect a Z-directional (optical axis AX directional) position of an exposure area inside and its vicinity area on the wafer W surface. The multi-point focal position detecting system (21, 22) is structured with an illumination optical system 21 made by an optical fiber bundle, a focus lens, a pattern forming plate, a lens, a mirror and an illumination objective lens (none shown), and a light-receiving optical system 22 made by a focusing objective lens, a rotational-direction vibration plate, a focus lens, a light-receiving slit plate and a light receiver having a

multiplicity of photosensors (none shown). The detailed structure of the multi-point focal position detecting system (21, 22) is disclosed, say, in JP-A-H6-283403. The detection result by the multi-point focal position detecting system (21, 22) is supplied to the stage control system 19.

[0053]

The wavefront-aberration measuring instrument 70 is structured with a wavefront sensor 90 and a wavefront-data processor 80.

[0054]

The wavefront sensor 90 has, as shown in Fig. 2, a label plate 91, a collimator lens 92, a relay lens system 93 formed by lenses 93a and 93b, a microlens array 94 as a wavefront splitter and a CCD 95 as an imaging device. Those are arranged on the optical axis AX1, in that order. Meanwhile, the wavefront sensor 90 further has a receiving member 97 that receives therein mirrors 96a, 96b, 96c, a collimator lens 92, a relay lens system 93, a microlens array 94, a CCD 95 and mirrors 96a, 96b, 96c, to establish an optical path of the light entering the wavefront sensor 90.

[0055]

The label plate 91 is basically formed, say, by a glass plate and arranged in the same height as the surface of the wafer W fixed on the wafer holder 25 in a manner being orthogonal to the optical axis AX1 (see Fig. 1). The label plate 91 has

a surface formed with an opening 91a centrally, as shown in Fig. 3. Meanwhile, three sets or more (four sets, in Fig. 3) of two-dimensional position detecting marks 91b are formed at around the opening 91a, in the surface of the label plate 91. The two-dimensional position detecting mark, in the embodiment, employs a combination of a line-and-space mark 91c formed along the X direction and a line-and-space mark 91d formed along the Y direction. Incidentally, the line-and-space marks 91c, 91d are to be observed by the foregoing alignment microscope AS. Meanwhile, reflective finish is done in the surface of the label plate 91, in an area excepting the opening 91a and two-dimensional position detecting mark 91b. Such reflective finish is made by depositing chromium (Cr) over a glass plate.

[0056]

Referring back to Fig. 2, the collimator lens 92 converts the light entering through the opening 91a into a plane wave.

[0057]

The microlens array 94 is arranged densely in a matrix form with a multiplicity of square microlenses 94a that have a positive refractive power, as shown in Fig. 4. Here, the microlenses 94a are arranged nearly parallel at their optical axes. Incidentally, in Fig. 4, there is shown an example of a matrix arrangement 7×7 of microlenses 94a. The microlenses 94a are not limited to square in form but may be rectangular. Meanwhile, the microlenses 94a may not be all in the same form.

The arrangement of the microlenses 94a, in the microlens array 94, may be unequal in pitch or in an oblique arrangement.

[0058]

The microlens array 94 like this is fabricated by conducting an etching on a parallel-surfaced glass plate. The microlens array 94 focuses the light passed through the relay lens system 93, into images of the opening 91a in positions different between the incident ones of microlenses 94a.

[0059]

Incidentally, the optical system, formed by the collimator lens 92, the relay lens system 93, the microlens array 94 and the mirrors 96a, 96b, 96c, is hereinafter referred to as a "wavefront-aberration measuring optical system".

[0060]

Referring back to Fig. 2, the CCD 95 has a light-receiving surface at a image plane where focused is a pinhole pattern image, referred later, formed by the microlenses 94a of the microlens array 94 in the opening 91a, i.e. at a conjugate surface to an opening 91a forming surface of the wavefront-aberration measuring optical system, to take an image of a multiplicity of pinholes that are focused on the light-receiving surface. The result of imaging is supplied as image data IMD to the wavefront-data processor 80.

[0061]

The receiving member 97 has a support member, not shown,

that supports therein the collimator lens 92, the relay lens system 93, the microlens array 94 and the CCD 95. Incidentally, the mirrors 96a, 96b, 96c are attached in an inner surface of the receiving member 97. The receiving member 97 has an exterior shape to fit with the bracket structure for the wafer stage WST so that it can be removably attached to the wafer stage WST.

[0062]

The wavefront-data processor 80 has a main control device 30 and a storage device 40, as shown in Fig. 5. The main control device 30 includes (a) a control device 39 that takes control of the operation overall of the wavefront-data processor 80 and supplies wavefront measurement data WFA to the main control system 20, (b) an image-data collector device 31 that gathers the image data IMD from the wavefront sensor 90, (c) a position detecting device 32 that detects the position of a spot image depending upon the image data, and (d) a wavefront-aberration calculating device 33 that calculates a wavefront aberration through the projection optical system PL depending upon the spot image position detected by the position detecting device 32.

[0063]

Here, the position detecting device 32 has (i) a data-distribution preparing device 34 as a preparing device that produces an analytic data distribution of spot image with

respect to X and Y directions depending upon the result of imaging, (ii) a determining device 35 that determines a pair of odd and even numbers on each of the analytic data distributions, (iii) an estimated-position calculating device 36 that calculates first and second estimated X positions depending upon the X-directional analytic data distribution and a pair of numbers in accordance therewith, and first and second estimated Y positions depending upon the Y-directional analytic data distribution and a pair of numbers in accordance therewith, and (iv) a spot-image position calculating device 37 that calculates a spot-image X position from the first and second estimated X positions and a spot-image Y position from the first and second estimated Y positions.

[0064]

Meanwhile, the storage device 40 has (a) an image-data storage area 41 to store image data, (b) a data-distribution storage area 42 to store the analytic data distribution, (c) an analytic-width storage area 43 to store the numbers defining the width of an analyzing range, (d) an estimated-position storage area 44 to store a calculated estimated position, (e) a spot-image position storage area 45 to store a calculated spot-image position, and (f) a wavefront-aberration data storage area 46 to store wavefront-aberration data.

[0065]

Although the embodiment configured the wavefront-data

processor 80 by combining various devices as in the above, the wavefront-data processor 80 can be configured as a computer system to thereby realize the functions of the devices constituting the main control device 30 by means of a program incorporated in the wavefront-data processor 80.

[0066]

Along with the flowchart shown in Fig. 6, explanation is made below on the printing operation by the lithographic printer 100 of the embodiment while suitably referring to other figures.

[0067]

Incidentally, as a premise of the following operation, it is assumed that the wavefront sensor 90 is arranged on the wafer stage WST while connection is provided between the wavefront-data processor 80 and the main control system 20.

[0068]

Meanwhile, it is also assumed that the positional relationship, between the opening 91a of the label plate 91 of the wavefront sensor 90 arranged on the wafer stage and the wafer stage ST, has been determined correctly by observing the two-dimensional mark 91b through use of the alignment microscope AS. Namely, depending upon the positional information (speed information) outputted from the wafer interferometer 18, the XY position of the opening 91 can be detected correctly. Moreover, by controlling the movement of

the wafer stage WST through the wafer stage drive section 24, the opening 91a can be assumed aligned accurately at a desired XY position. Incidentally, in the embodiment, the positional relationship between the opening 91a and the wafer stage WST are to be detected accurately by use of a statistic approach such as so-called enhanced global alignment (hereinafter, referred to as "EGA") disclosed in JP-A-S61-44429, based on the detection result of the positions of the four two-dimensional position marks 91b due to the alignment microscope AS.

[0069]

In the process shown in Fig. 6, firstly in a subroutine 101, a wavefront aberration is measured as to the projection optical system PL. In the wavefront aberration measurement, a reticle-to-measure RT for wavefront-aberration measurement shown in Fig. 8 is first loaded on the reticle stage RST at step S111 by means of a not-shown reticle loader, as shown in Fig. 7. The reticle-to-measure RT is formed with a plurality of pinhole patterns $PH_1 - PH_N$ ($N = 9$, in Fig. 8) along the X and Y directions in a matrix form. Incidentally, the pinhole patterns $PH_1 - PH_N$ are formed within an area having a size of a slit-like illumination area shown by the dotted lines in Fig. 8.

[0070]

Subsequently, measurement, etc. is made for the reticle

alignment by use of a not-shown reference mark plate arranged on the wafer stage WST and for the base line amount by use of the alignment microscope AS. Then, the reticle stage ST is moved such that the first pinhole pattern PH_1 to measure for aberration is positioned over the optical axis AX of the projection optical system PL. The movement is performed by controlling the reticle drive section through the stage control system 19 by means of the main control system 20, depending upon the positional information (speed information) of the reticle stage RST detected by the reticle interferometer 16.

[0071]

Referring back to Fig. 7, the wafer stage WST is moved such that the opening 91a of the label plate 91 of the wavefront sensor 90 comes to the conjugate position of the pinhole pattern PH_1 concerning the projection optical system PL (over the optical axis AX, for the pinhole pattern PH_1). The movement is performed by controlling the wafer stage drive section 24 through the stage control system 19 by means of the main control system 20, depending upon the positional information (speed information) of the wafer stage WST detected by the wafer interferometer 18. On this occasion, the main control section 20 drives slightly the wafer stage WST in the Z-axis direction through the wafer-stage drive section 24 in a manner aligning the upper surface of the label plate 91 of the wavefront sensor

90 with the image surface, where the pinhole image of the pinhole pattern PH_1 is focused, depending upon the detection result of the multi-point focal position detecting system (21, 22).

[0072]

In the above manner, the optical arrangement completes for the devices to measure a wavefront aberration of through the projection optical system PL, as to the spherical wave of from the first pinhole pattern PH_1 . In Fig. 9, there is shown a development of such an optical arrangement along the optical axis AX1 of the wavefront sensor 90 and the optical axis of the projection optical system PL.

[0073]

In the optical arrangement like this, illumination light IL is emitted from the illumination system 10, the light reached the first pinhole pattern PH_1 of the reticle-to-measure RT turns into a spherical wave that exits through the pinhole pattern PH_1 . After passing through the projection optical system PL, the light is focused on the opening 91a of the label plate 91 of the wavefront sensor 90. Incidentally, the light, passed the other pinhole pattern $PH_2 - PH_N$ than the first pinhole pattern PH_1 , does not reach the opening pattern 91a. In this manner, the light focused on the opening 91a has a wavefront nearly spherical but containing a wavefront aberration of through the projection optical system PL.

[0074]

The light, having passed the opening 91a, is converted into collimated light by the collimator lens 92 and then incident upon the microlens array 94 after having passed through the relay lens system 93. Here, the light entering the microlens array 94 has a wavefront reflected thereon a waveform aberration of through the projection optical system PL. Namely, where there is no wavefront aberration in the projection optical system PL, the wavefront WF thereof is given as a plane orthogonal to the optical axis AX1 as shown by the dotted line in Fig. 9. However, where there is a wavefront aberration of through the projection optical system PL, the wavefront WF' thereof inclines at an angle dependent upon the position as shown by the two-dot chain line in Fig. 9.

[0075]

The microlens array 94 focuses the opening 91a image on the conjugate plane of the label plate 91, i.e. the image plane of the CCD 95, on each microlens 94a basis. In the case the light incident upon the microlens 94a has a wavefront orthogonal to the optical axis AX1, a spot image is focused on the image plane in a position about the intersection between the optical axis of the microlens 94a and the image plane. Meanwhile, in the case the light incident upon the microlens 94a has a wavefront inclining, a spot image is focused on the image plane in a position about a point deviating from the

intersection between the optical axis of the microlens 94a and the image plane commensurate with the amount of inclination.

[0076]

Referring back to Fig. 7, at step 113, the image formed on the image plane is taken by the CCD 95. The image data IMD obtained by the imaging is supplied to the wavefront-data processor 80. In the wavefront-data processor 80, the image-data collector device 31 gathers the image data IMD and stores the gathered image data in the image-data storage areas 41.

[0077]

Then, in a subroutine 114, each spot image is detected for position depending upon the imaging result.

[0078]

Here, referring to Figs. 10(A) - 13, explanation is made on the overview of the principle of spot-image position detection to perform in the following. For the simplicity of explanation, the principle of positional detection is overviewed on an example where spot images are in a one-dimensional distribution. Meanwhile, the pixel has a width assumed as Δ .

[0079]

When spot images are formed as in the above, in the case a spot image $I(X)$ symmetric left and right has a center position (hereinafter, referred to as "spot-image position") lying at

a boundary X_j between a certain pixel and the adjacent pixel, the result of imaging generally provides a pixel-data distribution that is symmetric left and right about the position X_j . Accordingly, as shown in Fig. 10(A), correct coincidence results between the center-of-gravity position X_0 , calculated by a center-of-gravity method on the pixel-data distribution (data distribution shown as a bar graph in Fig. 10(A)) concerning an even number of pixels (four pixels, in Fig. 10(A)) nearby the spot-image position X_j , and the spot-image position X_j . However, as shown in Fig. 10(B), a positional difference results between the center-of-gravity position X_0 , calculated by a center-of-gravity method on the pixel-data distribution (data distribution shown as a bar graph in Fig. 10(B)) concerning an odd number of pixels (five pixels, in Fig. 10(B)) nearby the spot-image position X_j , and the spot-image position X_j .

[0080]

Meanwhile, when the spot image $I(X)$ has a spot image position in a center position of a certain pixel ($X_j + \Delta/2$), the result of imaging provides a pixel data distribution symmetric left and right about the position ($X_j + \Delta/2$). Accordingly, as shown in Fig. 11(A), correct coincidence results between the center-of-gravity position X_0 , calculated by the center-of-gravity method on the pixel-data distribution (data distribution shown as a bar graph in Fig. 11(A)) concerning

an odd number of pixels (five pixels, in Fig. 11(A)) nearby the spot-image position $(X_j + \Delta/2)$, and the spot-image position $(X_j + \Delta/2)$. However, as shown in Fig. 11(B), a positional difference results between the center-of-gravity position X_0 , calculated by a center-of-gravity method on the pixel-data distribution (data distribution shown as a bar graph in Fig. 11(B)) concerning an even number of pixels (four pixels, in Fig. 11(B)) nearby the spot-image position $(X_j + \Delta/2)$, and the spot-image position $(X_j + \Delta/2)$.

[0081]

Meanwhile, where the spot image $I(X)$ has a spot image position not at a pixel boundary position X_j nor pixel center position $(X_j + \Delta/2)$ but at a position $(X_j + \Delta X)$ ($\Delta X \neq 0, \Delta/2$), the calculated center-of-gravity position X_0 is different from the spot-image position $(X_j + \Delta/2)$ even if the number of pixels to be considered in the center-of-gravity method is taken odd (five in Fig. 12(A)) or even (four in Fig. 12(B)) nearby the spot-image position $(X_j + \Delta X)$, as shown in Figs. 12(A) and 12(B).

[0082]

In Fig. 13, there is shown a change of an error $\varepsilon E(\Delta X)$ (hereinafter, referred to as "even-based center-of-gravity error $\varepsilon E(\Delta X)$ ") from the true spot-image position $(X_j + \Delta X)$ which spot-image position is as a result of calculation by the center-of-gravity method by taking a width of even pixels as an analytic width due to a change of value ΔX ($0 \leq \Delta X \leq \Delta$) when

the spot image $I(X)$ is taken in a position $(X_j + \Delta X)$ and a change of an error $\varepsilon_O(\Delta X)$ (hereinafter, referred to as "odd-based center-of-gravity error $\varepsilon_O(\Delta X)$ ") from the true spot-image position $(X_j + \Delta X)$ which spot-image position is as a result of calculation by the center-of-gravity method by taking a width of odd pixels as an analytic width, explained in the above. As shown in Fig. 13, the even-based error $\varepsilon_E(\Delta X)$ is 0 at $\Delta X = 0$ and increases first toward the negative as ΔX increases from 0, thus attaining the maximum on the negative side at $\Delta X = (\Delta/2 - 0)$. The even-based error $\varepsilon_E(\Delta X)$ attains the maximum on the positive side at $\Delta X = (\Delta/2 + 0)$ and then decreases as ΔX increases, again becoming 0 at $\Delta X = 0$. Meanwhile, the odd-based error $\varepsilon_O(\Delta X)$ is maximal on the positive side at $\Delta X = 0$ and then decreases as ΔX increases from 0, becoming 0 at $\Delta X = \Delta/2$. Thereafter, the odd-based error $\varepsilon_O(\Delta X)$ increases toward the negative as ΔX increases, thus attaining the maximum at $\Delta X = \Delta$.

[0083]

As can be understood from Fig. 13, in the center-of-gravity method, with an analytic width of even number of pixels and an analytic width of odd number of pixels, within the range of ΔX where the position-detecting accuracy is well for one, the other is worse in position-detecting accuracy. Namely, the odd-based center-of-gravity error $\varepsilon_O(\Delta X)$ in absolute value is greater at around $\Delta X = 0, \Delta$ where

the even-based center-of-gravity error $\varepsilon_E(\Delta X)$ in absolute value is smaller. Meanwhile, the even-based center-of-gravity error $\varepsilon_E(\Delta X)$ in absolute value is greater at around $\Delta X = \Delta/2$, Δ where the odd-based center-of-gravity error $\varepsilon_O(\Delta X)$ in absolute value is smaller.

[0084]

Meanwhile, in an intermediate region between $\Delta X = 0$ and $\Delta X = \Delta/2$ and intermediate region between $\Delta X = \Delta/2$ and $\Delta X = \Delta$ where both the even-based and odd-based center-of-gravity errors $\varepsilon_E(\Delta X)$, $\varepsilon_O(\Delta X)$ have absolute values not so small, signs are reverse to each other between the even-based center-of-gravity error $\varepsilon_E(\Delta X)$ and the odd-based center-of-gravity error $\varepsilon_O(\Delta X)$. When considering an average position over a calculating position by the center-of-gravity method with an analytic width of even number of pixels (hereinafter, referred to as "even-based center-of-gravity position") and a calculating position by the center-of-gravity method with an analytic width of odd number of pixels (hereinafter, referred to as "odd-based center-of-gravity position"), the even-and-odd average-based position error $\varepsilon_A(\Delta X)$ in its absolute value is smaller than the absolute value of the even-based center-of-gravity error $\varepsilon_E(\Delta X)$ and odd-based center-of-gravity error $\varepsilon_O(\Delta X)$, in an intermediate region between $\Delta X = 0$ and $\Delta X = \Delta/2$, i.e. in a region of from $\Delta X = \Delta X_1$ to $\Delta X = \Delta X_2$, and in an intermediate region between $\Delta X = \Delta/2$

and $\Delta X = \Delta$, i.e. in a region of from $\Delta X = \Delta X_3$ to $\Delta X = \Delta X_4$, as shown in Fig. 13.

[0085]

Namely, the even-based, odd-based and even-and-odd average-based center-of-gravity positions each have a ΔX range where the error is smaller than in the region of the others. By utilizing it, calculation is first made for even-based and odd-based center-of-gravity positions of spot images. The value ΔX , that can be estimated from the calculation result, is applied to the ΔX of Fig. 13. Subsequently, determination is made as to which range of $0 - \Delta X_1$, $\Delta X_1 - \Delta X_2$, $\Delta X_2 - \Delta X_3$, $\Delta X_3 - \Delta X_4$, $\Delta X_4 - \Delta$ the estimated ΔX falls within. Then, depending upon the determination result, the position where the error is the smallest is taken as a spot-image position of among those of the even-based, odd-based and even-and-odd average-based center-of-gravity positions whereby the detection accuracy of spot-image position can be improved greater than the case where to detect a spot-image position by the center-of-gravity method with use of one analytic width of pixels. This improvement of detection accuracy is obtained greater as the analytic width of pixels is narrower.

[0086]

Incidentally, the change form of even-based and odd-based center-of-gravity errors $\varepsilon_E(\Delta X)$, $\varepsilon_O(\Delta X)$ due to the change of ΔX differs by the data count to use in calculating

a center-of-gravity in the center-of-gravity method. Accordingly, although the range where the error is minimal of those of even-based, odd-based and even-and-odd average-based center-of-gravity positions differs depending upon the data count to use in calculating a center-of-gravity in the center-of-gravity method, the range can be determined by a simple calculation. Meanwhile, in case the data count candidate is previously known that is to use in calculating a center-of-gravity in the center-of-gravity method, the range can be prepared as a table for each data count.

[0087]

In the subroutine 114 (see Fig. 7) of the embodiment, spot-image positions are detected based on the result of imaging, on the basis of the detection principle of spot-image positions explained so far.

[0088]

In the subroutine 114, as shown in Fig. 14, the data-distribution preparing device 34 of the position-detecting device 32 at step 121 first reads image data out of the image-data storage area 41, to extract a region the first spot image ($j = 1$) is formed. In the extraction of a region, the data-distribution preparing device 34 searches, say, a two-dimensional peak having a peak in a value equal to or greater than a predetermined value in the data image taken. Then, assuming a plurality of two-dimensional peaks searched

respectively as spot images, the data-distribution preparing device 34 extracts a region of the first spot image. The spot image regions SPA_j thus extracted are shown in Fig. 15(A). Incidentally, in Fig. 15(A), there is shown a case that the spot image region SPA_j is a square region of 7 pixels (X direction) × 7 pixels (Y direction) where the minimal value in the X-directional region and minimal value Y_j in the YX-directional region. Meanwhile, in Fig. 15, the pixels PX have an X-directional length of Δ and a Y-directional length of Δ . Meanwhile, in Fig. 15, the pixels that are bright are hatched crossed, the pixels that are dark are opened, and the pixels that are middle bright are singly hatched.

[0089]

Referring back to Fig. 14, the data-distribution preparing device 34 at step 122 then prepares an X-directional analytic data distribution JX(X) and a Y-directional analytic data distribution JY(Y). In preparing the X-directional and Y-directional analytic data distributions JX(X), JY(Y), the data-distribution preparing device 34 first extracts the pixels that are brighter than a predetermined threshold. Incidentally, the predetermined threshold is established at a value, determined in the previous measurement or simulation, considered determinable to contain a signal component other than noise. As a result, pixel data is assumed extracted of the pixels hatched crossed and the pixels hatched singly in

Fig. 15(A).

[0090]

Subsequently, the data-distribution preparing device 34 calculates a sum over those of pixel data extracted that are equal in X position of the pixel data and prepares an analytic data distribution $JX(X)$. The analytic data distribution $JX(X)$ thus prepared is shown in Fig. 15(B). Meanwhile, the data-distribution preparing device 34 calculates a sum over those of pixel data extracted that are equal in Y position of the pixel data and prepares an analytic data distribution $JY(Y)$, similarly to the case of the analytic data distribution $JX(X)$. In this manner, in preparing the analytic data distributions $JX(X)$, $JY(Y)$, the pixel data brighter than the predetermined value is used because of preventing noise components from being immixed in the analytic data distribution $JX(X)$, $JY(Y)$ to a possible extent.

[0091]

Meanwhile, the data-distribution preparing device 34 determines the maximum number NX of pixels on each pixel column along the X direction and the maximum number NY of pixels on each pixel column along the Y direction, in the distribution of extracted pixel data. Incidentally, in Fig. 15(A) case, determined are the maximum number $NX = 5$ and the maximum number $NY = 5$.

[0092]

Then, the data-distribution preparing device 34 stores the determined analytic data distributions $JX(X)$, $JY(Y)$ and maximum numbers NX , NY in the data-distribution storage area 42.

[0093]

Referring back to Fig. 14, the determining device 35 of the position detecting device 32 at step 123 reads the maximum numbers NX , NY out of the data-distribution storage area 42 and determines one odd number NX_1 and one even number NX_2 , defining the analysis range in the analytic data distribution $JX(X)$, for use in detecting an X-position of the spot image. Meanwhile, the determining device 35 determines one odd number NY_1 and one even number NY_2 , defining the analysis range in the analytic data distribution $JY(Y)$, for use in detecting a Y-position of the spot image.

[0094]

Here, when the number of pixels NX is an odd number, the number NX_1 is determined as the number NX while the number NX_2 is determined as the number $(NX - 1)$. Meanwhile, when the number of pixels NX is an even number, the number NX_2 is determined as a number NX while the number NX_1 is determined as a number $(NX - 1)$. Incidentally in the case shown in Fig. 15(A), determination is as $NX_1 = 5$ and $NX_2 = 4$ because of the maximum number $NX_1 = 5$.

[0095]

Meanwhile, when the number of pixels NY is an odd number, the number $NY1$ is determined as the number NY while the number $NY2$ is determined as the number $(NY - 1)$. Meanwhile, when the number of pixels NY is an even number, the number $NY2$ is determined as the number NY while the number $NY1$ is determined as a number $(NY - 1)$. Incidentally in the case shown in Fig. 15(A), determination is as $NY1 = 5$ and $NY2 = 4$ because of the maximum number $NY = 5$.

[0096]

The determining device 35 stores the determined numbers $NX1$, $NX2$, $NY1$, $NY2$ in the analytic-width storage area 43.

[0097]

Incidentally, the reason why the number $NX1$, $NX2$ is provided as a number equal to or smaller than the maximum number NX is because to reduce the effect of noise in analyzing the analytic data distribution $JX(X)$. Meanwhile, the reason why the number $NX1$, $NX2$ is provided as an odd and even number most approximate to the maximum number NX is because to secure data count to a possible great extent and to improve the estimation accuracy of a spot-image position due to calculating a center-of-gravity position in the center-of-gravity method. Because of the similar reason to this, the numbers $NY1$, $NY2$ are provided as odd and even numbers equal to or smaller than the maximum number NY and most approximate to the number NY .

[0098]

Referring back to Fig. 14, the estimated-position calculating device 36 of the position detecting device 32 at step 124 reads the analytic data distributions $JX(X)$, $JY(Y)$ out of the data-distribution storage area 42, and numbers $NX1$, $NX2$, $NY1$, $NY2$ out of the analytic-width storage area 43. Subsequently, the estimated-position calculating device 36 calculates a first estimated X position $X1$ by the center-of-gravity method depending upon the analytic data distribution $JX(X)$ and the number $NX1$, and a second estimated X position $X2$ by the center-of-gravity method depending upon the analytic data distribution $JX(X)$ and the number $NX2$.

[0099]

Here, in the case of using an analytic width defined by an odd number NO ($=NX1$ or $NX2$), i.e. odd number NO of pixel count data, used are the data of maximum-data pixel position (hereinafter, referred to as "maximum-data pixel position") and data of pixel positions on both sides of the maximum-data pixel position each in the number of $((NO - 1)/2)$. As a spot-image estimated X position, calculated is a center-of-gravity position (odd-based center-of-gravity position) in the distribution of data in the number of NO . For example, in the case of an analytic data distribution $JX(X)$, say, as in Fig. 15(B) and $NO = 5$, then all the data of $D1 - D5$ is used to calculate an odd-based center-of-gravity position.

[0100]

Meanwhile, in the case of using an analytic width defined by an even number NE (= NX1 or NX2), i.e. even number NE of pixel count data, used are the data of the maximum-data pixel position, a pixel position of the data greater of the pixel position data adjacent to and on both sides of the maximum data pixel position, and data of the maximum data pixel position and pixel position, pixel position data each in the number of $((NE - 2)/2)$ on the left and right of the two pixel position. As a spot-image estimated X position, a center-of-gravity position (even-based center-of-gravity position) is calculated for a distribution of data in the number of NE. For example, in the case of an analytic data distribution JX(X), say, as in Fig. 15(B) and NO = 4, then the data D1 - D4 is used to calculate an even-based center-of-gravity position

[0101]

Meanwhile, the estimated-position calculating device 36 calculates a first estimated Y position Y1 by the center-of-gravity method depending upon the analytic data distribution JY(Y) and number NY1, and a second estimated Y position Y2 by the center-of-gravity method depending upon the analytic data distribution JY(Y) and the number NY2, similarly to the case of the analytic data distribution JX(X).

[0102]

The estimated position calculating device 36 stores the

first and second estimated X positions X_1 , X_2 , the first and second estimated Y positions Y_1 , Y_2 , and the numbers NX_1 , NX_2 , NY_1 , NY_2 .

[0103]

Referring back to Fig. 14, the spot-image calculating device 37 of the position detecting device 32 at step 125 reads the first and second estimated X positions X_1 , X_2 , the first and second estimated Y positions Y_1 , Y_2 , and the numbers NX_1 , NX_2 , NY_1 , NY_2 , out of the estimated-position storage area 44, thus calculating the X and Y positions of the spot image. In calculating the X and Y positions, the spot-image position calculating device 37 first estimates the foregoing ΔX from the first and second estimated X positions X_1 , X_2 , and determines which range of $0 - \Delta X_1$, $\Delta X_1 - \Delta X_2$, $\Delta X_2 - \Delta X_3$, $\Delta X_3 - \Delta X_4$, $\Delta X_4 - \Delta$ the estimated ΔX falls within. Subsequently, determination is made as to which X estimated positions of the first and second estimated X positions X_1 , X_2 and the average estimated X position $X_A (= (X_1 + X_2))$ is considered the least in error, depending upon the determination result.

[0104]

The X estimated position considered the least in error is determined as an X position of the spot image. Subsequently, the spot-position calculating device 37 determines which Y estimated position is considered the least in error among the first and second estimated Y positions Y_1 , Y_2 and the average

estimated Y position $Y_A (= (Y_1 + Y_2)/2)$, depending upon the first and second estimated Y positions Y_1 , Y_2 and numbers NY_1 , NY_2 . The Y estimated position considered the least in error is determined as a Y position of the spot image.

[0105]

The spot-image position calculating device 37 stores the determined spot-image X and Y positions in the spot-image storage area 45.

[0106]

Referring back to Fig. 14, it is determined at step 126 whether or not all the spot-image positions have been detected in position. In this stage, because nothing has been detected more than the first spot-image position, negative determination is made and hence the process moves to step 127.

[0107]

At the step 127, the data-distribution preparing device 34 extracts the region the next spot image is formed. From then on, the steps 122 - 127 are repeated until an affirmative determination is done at the step 126. Similarly to the detection of the first spot-image position, spot-image positions are detected in order and stored in the spot-image position storage area 45. When an affirmative determination is made at the step 126, the process of the subroutine 114 is ended and the process moves to step 115 in Fig. 7.

[0108]

At the step 115, the wavefront-aberration calculating device 33 reads the detection result of spot-image positions out of the spot-image storage area 45 and calculates a wavefront aberration of through the projection optical system PL as to the light passed through the first pinhole pattern PH₁ of the reticle-for-measurement RT. The wavefront aberration is calculated by determining a coefficient of a Czernik polynomial, from the difference between the spot-image position expected in the absence of wavefront aberration and the detected spot-image position. The wavefront aberration thus determined is stored, together with the pinhole pattern PH₁ position, in the wavefront-aberration data storage area 46.

[0109]

Then, at step 116, it is determined whether or not the wavefront aberration of through the projection optical system PL has been calculated on all the pinhole patterns. In this stage, because the wavefront aberration of through the projection optical system PL has been calculated only on the first pinhole pattern PH₁, determination is made negative and hence the process moves to step 117.

[0110]

At the step 117, the wafer stage WST is moved such that the opening 91a of the label plate 91 of the wavefront sensor 90 comes to the conjugate position of the next pinhole pattern

PH to the projection optical system PL. The movement is made by controlling the wafer-stage drive section 24 through the stage control system 19 by means of the main control system 20, depending upon the positional information (speed information) of the wafer stage WST detected by the wafer interferometer 18. Incidentally, in also this time, depending upon the multi-point focal position detecting system (21, 22), the main control system 20 slightly drives, as required, the wafer stage WST in the Z-axis direction through the wafer-stage drive section 24, in order to place the upper surface of the label plate 91 of the wavefront sensor 90 in coincidence with the image plane on which the image of pinhole pattern PH₂ is focused.

[0111]

Similarly to the case of the pinhole pattern PH₁, measured is the wavefront aberration of through the projection optical system PL. The result of wavefront aberration measurement is stored, together with the pinhole pattern PH₂ position, in the wavefront-aberration data storage area 44.

[0112]

From then on, similarly to the above, measurement is made, in order, for the wavefront aberrations of the projection optical system PL as to all the pinhole patterns. The measurement result on each opening pattern is stored, together with the opening pattern position, in the wavefront-aberration

data storage area 44. After measured the wavefront aberrations of the projection optical system PL as to all the pinhole patterns, affirmative determination is made at the step 117. Then, the control device 39 reads the measurement result of wavefront aberration out of the wavefront-aberration data storage area 44 and supplies it, as wavefront-measurement result data WFA, to the main control system 20. Thereafter, the process moves to step 102 in Fig. 6.

[0113]

At the step 102, the main control system 20 determines whether or not the measurement of wavefront aberration of through the projection optical system PL is equal to or smaller than a permissible value, depending upon the wavefront-measurement result data WFA supplied from the control device 39. When the determination is affirmative, the process moves to step 104. Meanwhile, when the determination is negative, the process moves to step 103. Assuming that the determination is negative in this stage and the process moves to the step 103, the following is explained.

[0114]

At the step 103, the main control device 20 adjusts the wavefront aberration of through the projection optical system PL in a manner reducing the wavefront aberration now present, depending upon the measurement result of wavefront aberration of through the projection optical system PL. The wavefront

aberration is adjusted by controlling the movement of the lens element through the focus-characteristic correcting controller 51 by means of the control device 39 or, in a certain case, by manually moving the lens element of the projection optical system PL on the XY plane or exchanging the lens element.

[0115]

Subsequently, in the subroutine 101, the adjusted wavefront aberration is measured as to the projection optical system PL, similarly to the above. From then on, the wavefront aberration adjustment of the projection optical system PL (step 103) and the measurement of wavefront aberration (step 101) are repeated until an affirmative determination is made at the step 102. When an affirmative determination is made at the step 102, the process moves to step 104.

[0116]

At the step 104, the wavefront sensor 90 is removed from the wafer stage WST, to make a disconnection between the wavefront-data processor 80 and the main control system 20. Thereafter, a reticle R, formed with a pattern desired to transfer, is loaded on the reticle stage RST by means of a not-shown reticle loader, under control of the main control system 20. Meanwhile, a wafer W desired for printing is loaded onto the wafer stage WST by means of the not-shown wafer loader.

[0117]

Then, at step 105, measurement preparatory for printing is conducted under control of the main control system 20. Namely, preparatory operations are performed including a reticle alignment using a not-shown reference mark plate arranged on the wafer stage WST and a baseline amount measurement using the alignment microscope AS. Meanwhile, when the printing of the wafer W is for the second-level layer or higher, the arrangement coordinate of a shot area is accurately detected on the wafer W by the EGA measurement using the alignment microscope AS in order to form a circuit pattern with well overlying accuracy with the circuit pattern already formed.

[0118]

Then, at step 106, printing is conducted. In the printing operation, the wafer stage WST is moved such that the wafer W at its XY position comes to a scanning start position for printing of the first shot area over the wafer W. Depending upon the positional information (speed information), etc. of from the wafer interferometer 18 (for the case of printing of the second-level layer and higher, detection result of the positional relationship between the reference coordinate system and the arrangement coordinate system, positional information (speed information) of from the wafer interferometer 18, etc.), that is effected through the stage control system 19, wafer-stage drive section 24, etc. by the

main control system 20. Simultaneously, the reticle stage RST is moved such that the reticle R at its XY position comes to a scanning start position. The movement is made by the main control system 20 through the stage control system 19, not-shown reticle drive section, etc.

[0119]

Then, according to the instruction of from the main control system 20, the stage control system 19 performs a scan printing by relatively moving the reticle R and the wafer W while adjusting the surface position of the wafer W, through the not-shown reticle drive section and wafer-stage drive section 24, depending upon the wafer Z positional information detected by the multi-point focal position detecting system (21, 22), the reticle-R XY positional information measured by the reticle interferometer 16 and the wafer-W XY positional information measured by the wafer interferometer 18.

[0120]

After completing the printing of the first shot area in this manner, the wafer stage WST is moved to a scanning start position for printing at the next shot area while the reticle stage RST is moved to a scanning start position at the XY position of the reticle R. Then, scanning printing is conducted as to the relevant shot area similarly to the first shot area. From then on, scanning printing is conducted similarly as to each shot area, thus completing the printing.

[0121]

At step 107, the wafer W completed of printing is unloaded from the wafer holder 25 by means of a not-shown unloader. In this manner, the printing process on one wafer W completes.

[0122]

In the subsequent printing of the wafer, wafer printing operation is conducted at steps 104 - 107 while measuring and adjusting the wavefront aberration of through the projection optical system PL at the steps 101 - 103 as required.

[0123]

As explained above, the embodiment applies the center-of-gravity method to an analytic data distribution at an analytic width each defined by one pair of odd and even numbers, to calculate as a spot-image estimated position an odd-based center-of-gravity position upon using an estimated analytic width and an odd number and an even center-of-gravity position upon using an estimated analytic width and an even number. Based on the odd-based and even-based center-of-gravity positions, a spot-image position is determined while taking account of the nature of error occurrence due to the center-of-gravity method. Accordingly, even where there are a smaller number of pixels in a spot image, a spot-image position can be detected with swiftness and accuracy.

[0124]

Meanwhile, in preparing an analytic data distribution for use in detecting a spot-image position, spot-image position can be accurately detected because of no use of pixel data considered in a level of noise.

[0125]

Meanwhile, because of preparing the analytic data distribution by maximally utilizing the data considered containing a signal component, spot-image position can be detected accurately.

[0126]

Meanwhile, because of detecting a spot-image position by determining an estimated position considered the smallest in error of among the odd-based, even-based and average center-of-gravity positions, spot-image position can be detected with swiftness and accuracy.

[0127]

Meanwhile, because of calculating the wavefront aberration of through the projection optical system PL by using a spot-image position determined accurately, a wavefront aberration of through the projection optical system can be determined accurately.

[0128]

Meanwhile, by adjusting the aberration of through the projection optical system PL depending upon the wavefront aberration of through the projection optical system PL

determined accurately, a predetermined pattern formed on the reticle R can be projected onto a wafer-W surface by the projection optical system PL whose aberrations are fully reduced. Accordingly, the predetermined pattern can be accurately transferred to the wafer W.

[0129]

Incidentally, the embodiment prepared an analytic data distribution concerning a predetermined direction for use in detecting a spot-image position by taking a sum over pixel columns without using the pixel data considered in a level of noise. Alternatively, an analytic data distribution can be prepared concerning a predetermined direction by taking a sum over a plurality of pixel columns made up by the maximum number of pixels of among those a predetermined threshold of pixel data is arranged continuous along a predetermined direction in a spot-image pixel data distribution. In such a case, because noise components are averaged that are contained in the data of each pixel position in the analytic data distribution, spot-image position can be detected accurately.

[0130]

Meanwhile, the embodiment detected a spot-image position by determining an estimated position considered the smallest in error of among the odd-based, even-based and average center-of-gravity positions. Alternatively, spot-image position can be detected also by calculating a

weighted mean over odd-based and even-based center-of-gravity positions. Namely, spot-image position can be detected accurately by calculating a weighted mean that weight is increased at the odd-based center-of-gravity position in the range where odd-based center-of-gravity position is well in accuracy while weight is increased at the even-based center-of-gravity position in the range where even-based center-of-gravity position is well in accuracy.

[0131]

For such a weighted mean position PD, provided that the width of pixels is Δ , the odd-based center-of-gravity position is PO, the even-based center-of-gravity position is PE, the mean center-of-gravity position is PA ($= (PO + PE)/2$) and the area of pixels where the odd-based and even-based center-of-gravity positions PO, PE are existent is $[PS, PS + \Delta]$, then the following equations (2) - (4) are to be employed.

$$WO = (PA - PS) / (\Delta/2) \quad \dots (2)$$

$$WE = (PS - \Delta/2 - PA) / (\Delta/2) \quad \dots (3)$$

$$PD = WO \cdot PO + WE \cdot PE \quad \dots (4)$$

[0132]

The error ε_B , from the true spot-image position of the spot position calculated from the above equations (2) - (4), is given at the solid line shown in Fig. 16. Incidentally, in Fig. 16, there are shown, for comparison, at the dotted lines the error ε_O of the odd-based center-of-gravity position from the true

spot-image position and the error εE of the even-based center-of-gravity position from the true spot-image position. As understood from Fig. 16, the spot-image position PD calculated by the equations (2) - (4) is matched to the true spot-image position with quite well accuracy.

[0133]

Second Embodiment

A second embodiment of the invention will be explained in the below. The lithographic printer in this embodiment is structured similarly to the lithographic printer 100 of the first embodiment. The difference from the first embodiment lies only in that the operation of data-distribution preparing device 34, the determining device 35, the estimated-position calculating device 36 and the spot-image position calculating device 37 in Fig. 5, i.e. the process at steps 122 - 125 in Fig. 14. Accordingly, the present embodiment is explained below while putting the eye on the difference. Incidentally, in explaining the embodiment, the elements equivalent to those of the first embodiment are attached with the same reference numerals, to omit duplicated explanations.

[0134]

Explanation is now made below on the printing operation of the lithographic printer 100 of the present embodiment.

[0135]

In the embodiment, wavefront aberration is also measured

on the projection optical system PL in Fig. 6 subroutine 101, similarly to the first embodiment. In the measurement of wavefront aberration, the steps 111 - 113 shown in Fig. 7 are executed similarly to the first embodiment, i.e. executed are loading of a reticle-for-measurement (step 111), moving the wavefront sensor 90 to a first measurement position (step 112), and imaging of a spot image (step 113). In a subroutine 114, spot-image positions are detected.

[0136]

In the subroutine 114, the data-distribution preparing device 34 of the position detecting device 32, at step 121 in Fig. 14, first reads image data out of the image-data storage area 41 and extracts the region the first spot image ($j = 1$) is formed. The spot image region SPA $_j$ thus extracted is shown in Fig. 17(A).

[0137]

Referring back to Fig. 14, the data-distribution preparing device 34 at step 122 prepares X-directional analytic data distribution $JX_p(X)$ ($p = 1, \dots$) and Y-directional analytic data distribution $JY_q(Y)$ ($q = 1, \dots$). In preparing the analytic data distributions $JX_p(X)$, $JY_q(Y)$, the data-distribution preparing device 34 first extracts the pixels that had a brightness equal to or greater than a predetermined threshold. As a result, in the pixel-data distribution in Fig. 17(A), pixel data extraction has

assumably been made of the pixels hatched crossed and the pixels hatched singly.

[0138]

Subsequently, the data-distribution preparing device 34 extracts the string of pixels successively arranged equal to or greater than a predetermined number (e.g. four) along the X direction, out of the extracted pixel data. The pixel data distribution in the extracted pixel string is rendered as an analytic data distribution $JX_p(X)$ ($p = 1, \dots$). In Fig. 17(a), the pixel strings which the pixels having a brightness equal to or greater than the predetermined threshold are arranged successively four or more, are those that are along the SLX_1 axis, SLX_2 axis and SLX_3 axis that are parallel with the X axis. As a result, as analytic data distributions $JX_p(X)$ are determined a pixel-data distribution $JX_1(X)$ of a string having five pixels along the SLX_1 axis in Fig. 17(B), a pixel-data distribution $JX_2(X)$ of a string having five pixels along the SLX_2 axis in Fig. 17(C), and a pixel data distribution $JX_3(X)$ of a string having four pixels along the SLX_3 axis in Fig. 17(D). Meanwhile, the data-distribution preparing device 34 extracts the pixel strings successively arranged equal to or greater than a predetermined number (e.g. four) along the Y direction, out of the extracted pixel data. The pixel data distribution in the extracted pixel string is rendered as an analytic data distribution $JY_p(Y)$.

[0139]

The data-distribution preparing device 34 determines the number of pixels in each of the analytic data distribution $JX_p(X)$ and the number of pixels in each of the analytic data distribution $JY_p(Y)$. For example, the number of pixels NX_1 , NX_2 , NX_3 in Fig. 17(B) - 17(D) is "5, 5, 4".

[0140]

The data-distribution preparing device 34 stores the determined analytic data distributions $JX_p(X)$, $JY_q(Y)$ and the maximum numbers NX_p , NY_q in the data-distribution storage area 42.

[0141]

Referring back to Fig. 14, at step 123, the deciding device 35 of the position detecting device 32 reads the maximum numbers NX_p , NY_q out of the data-distribution storage area 42 and determines one odd number $NX1_p$ and one even number $NX2_p$, that define respective analyzing ranges of the analytic data distributions $JX_p(X)$, for use in detecting a spot-image X position. Meanwhile, the determining device 35 determines one odd number $NY1_q$ and one even number $NY2_q$, that define respective analyzing ranges of the analytic data distributions $JY_p(Y)$, for use in detecting a spot-image Y position.

[0142]

Here, when the number of pixels NX_p is an odd number, the number $NX1_p$ is determined as a number NX_p and the number

NX_{2p} as a number $(NX_p - 1)$. Meanwhile, when the number of pixels NX_p is an even number, the number NX_{2p} is determined as a number NX_p and the number NX_{1p} as a number $(NX_p - 1)$. Incidentally, because of the maximum number $NX_1 = 5$ in the analytic data distribution $JX_1(X)$ shown in Fig. 17(B), determination is as $NX_{11}=5$ and $NX_{21} = 4$. Meanwhile, because of the maximum number $NX_2 = 5$ in the analytic data distribution $JX_2(X)$ shown in Fig. 17(C), determination is as $NX_{12}=5$ and $NX_{22} = 4$. Because of the maximum number $NX_3 = 4$ in the analytic data distribution $JX_3(X)$ shown in Fig. 17(D), determination is as $NX_{13}=3$ and $NX_{23} = 4$.
[0143]

Meanwhile, when the number of pixels NY_q is an odd number, the number NY_{1q} is determined as a number NY_q and the number NY_{2q} as a number $(NY_q - 1)$. Meanwhile, when the number of pixels NY_q is an even number, the number NY_{2q} is determined as a number NY_q and the number NY_{1q} as a number $(NY - 1)_q$.
[0144]

Then, the determining device 35 stores the determined numbers NX_{1p} , NX_{2p} , NY_{1q} , NY_{2q} in the analytic-width storage area 43.
[0145]

Referring back to Fig. 14, the estimated-position calculating device 36 of the position detecting device 32 at step 124 reads the analytic data distributions $JX_p(X)$, $JY_q(Y)$ out of the data-distribution storage area 42, and the numbers

$NX1_p$, $NX2_p$, $NY1_q$, $NY2_q$ out of the analytic-width storage area 43. Subsequently, the estimated-position calculating device 36 calculates a first estimated X position $X1_p$ on each analytic data distribution $JX_p(X)$ by the center-of-gravity method depending upon the analytic data distribution $JX_p(X)$ and number $NX1_p$ similarly to the case in the first embodiment, and a second estimated X position $X2_p$ by the center-of-gravity method depending upon the analytic data distribution $JX_p(X)$ and number $NX2_p$.

[0146]

Meanwhile, the estimated-position calculating device 36 calculates a first estimated Y position $Y1_q$ by the center-of-gravity method depending upon the analytic data distribution $JY_q(Y)$ and the number $NY1_q$, and a second estimated Y position $Y2_q$ on each analytic data distribution $JY_q(Y)$ by the center-of-gravity method depending upon the analytic data distribution $JY_q(Y)$ and the number $NY2_q$, similarly to the case of the analytic data distribution $JX_p(X)$.

[0147]

Then, the estimated-position calculating device 36 stores the first and second estimated X positions $X1_p$, $X2_p$, the first and second estimated Y positions $Y1_q$, $Y2_q$ and the numbers $NX1_p$, $NX2_p$, $NY1_q$, $NY2_q$ in the estimated-position storage area 44.

[0148]

Referring back to Fig. 14, the spot-image position calculating device 37 of the position detecting device 32 at step 125 reads the first and second estimated X positions $X1_p$, $X2_p$, the first and second estimated Y positions $Y1_q$, $Y2_q$ and $NX1_p$, $NX2_p$, $NY1_q$, $NY2_q$ out of the estimated-position storage area 44, and calculates spot-image X and Y positions. In calculating the spot-image X and Y positions, the spot-image position calculating device 37 first determines, for each of the analytic data distributions $JX_p(X)$, which X estimated position of among the first, second and mean estimated X position $X1_p$, $X2_p$ and XA_p ($= (X1_p + X2_p)/2$) is considered the least in error, depending upon the first and second estimated X positions $X1_p$, $X2_p$ and the numbers $NX1_p$, $NX2_p$. Thus, the X estimated position considered the least in error is determined as a discrete estimated X position $X0_p$ on each analytic data distributions $JX_p(X)$. Then, depending upon the number of pixels, pixel data values, etc. of each analytic data distribution $JX_p(X)$, a weighted mean over the discrete estimated X positions $X0_p$ is calculated with a weight of a statistic reliability of each discrete estimated X position $X0_p$ previously determined by simulation or so.

[0149]

Subsequently, the spot-image position calculating device 37 determines the discrete estimated Y positions $Y0_q$ depending upon the first and second Y estimated positions $Y1_q$,

$Y2_q$ and the numbers $NY1_q$, $NY2_q$, similarly to the case of the spot-image X position. By calculating a weighted mean over the discrete estimated Y positions YO_q by using a weight of statistic reliability of the discrete estimated Y positions YO_q , spot-image Y position is determined.

[0150]

The spot-image position calculating device 37 stores the determined spot-image X and Y positions in the spot-image position storage area 45.

[0151]

From then on, all the spot-image positions are detected to measure a wavefront aberration, similarly to the case in the first embodiment. Subsequently, the wavefront aberration is adjusted as required to reduce the wavefront aberration of through the projection optical system PL. By using the projection optical system PL whose wavefront aberration is adjusted decreased, the wafer W is exposed to radiation thereby transferring the pattern formed on the reticle R to the surface of the wafer W.

[0152]

As explained above, for each of a plurality of analytic data distributions, the embodiment applies the center-of-gravity method to the analytic data distribution at an analytic width each defined by one pair of odd and even numbers, to calculate as a spot-image estimated position an

odd-based center-of-gravity position upon using an estimated analytic width and an odd number and an even center-of-gravity position upon using an analytic width and an even number. Based on the odd-based and even-based center-of-gravity positions, a discrete estimated position is determined on each analytic data distribution while taking account of the nature of error occurrence due to the center-of-gravity method. Thereafter, a weighted mean is calculated over the discrete estimated values based on the statistic reliabilities of the discrete estimated values, thereby determining a spot image. Accordingly, even where there are a smaller number of pixels in a spot image, a spot-image position can be detected with swiftness and accuracy.

[0153]

Meanwhile, in preparing an analytic data distribution for use in detecting a spot-image position, spot-image position can be accurately detected because of no use of pixel data considered in a level of noise, similarly to the first embodiment.

[0154]

Meanwhile, because of preparing the analytic data distribution by maximally utilizing the data considered containing a signal component, spot-image position can be detected accurately.

[0155]

Meanwhile, because of detecting a spot-image position by determining an estimated position considered the smallest in error of among the odd-based, even-based and average center-of-gravity positions, spot-image position can be detected with swiftness and accuracy.

[0156]

Meanwhile, because of calculating the wavefront aberration of through the projection optical system PL by using a spot-image position determined accurately, a wavefront aberration of through the projection optical system can be determined accurately.

[0157]

Meanwhile, by adjusting the aberration of through the projection optical system PL depending upon the wavefront aberration of through the projection optical system PL determined accurately, a predetermined pattern formed on the reticle R can be projected onto a wafer-W surface by the projection optical system PL whose aberrations are fully reduced. Accordingly, the predetermined pattern can be accurately transferred to the wafer W.

[0158]

Incidentally, the embodiment prepared an analytic data distribution concerning a predetermined direction for use in detecting a spot-image position by taking a sum over pixel columns without using the pixel data considered in a level of

noise. Alternatively, an analytic data distribution can be prepared concerning a predetermined direction by taking a sum over a plurality of pixel columns made up by the maximum number of pixels of among those a predetermined threshold of pixel data is arranged continuous along a predetermined direction in a spot-image pixel data distribution, similarly to the first embodiment.

[0159]

Meanwhile, the embodiment detected a discrete estimated position by determining an estimated position considered the smallest in error of among the odd-based, even-based and average center-of-gravity positions. Alternatively, spot-image position can be detected also by calculating a weighted mean over odd-based and even-based center-of-gravity positions. Namely, spot-image position can be detected accurately by calculating a weighted mean that weight is increased for the odd-based center-of-gravity position in the range where odd-based center-of-gravity position is well in accuracy while weight is increased for the even-based center-of-gravity position in the range where even-based center-of-gravity position is well in accuracy.

[0160]

Incidentally, in the embodiments, one odd number and one even number were used in determining odd-based and even-based center-of-gravity positions. Alternatively, two or more odd

or even numbers can be used.

[0161]

Meanwhile, in the embodiments, the center-of-gravity method was used in determining two estimated values from the analytic data distribution, depending upon the odd and even numbers. Alternatively, other algorithms can be used. Namely, an algorithm, if two estimated values in accordance with the odd and even numbers has a known relationship, can be used in place of the center-of-gravity method.

[0162]

In the embodiments, the odd and even numbers were determined from the spot images taken. However, where the spot image size can be estimated previously, odd and even numbers for use in the center-of-gravity method can be determined in accordance with the size thereof. In such a case, the determining device 35 can be omitted in the embodiment.

[0163]

Meanwhile, in the embodiments, opening patterns were nine in the number in the reticle-for-measurement. The number can be increased and decreased in accordance with the measurement accuracy of a desired wavefront aberration. Meanwhile, the number and form, in microlens 94a arrangement in the microlens array 94, can be changed in accordance with the measurement accuracy of a desired wavefront aberration.

[0164]

Meanwhile, in the embodiments, during printing, the wavefront-aberration measuring instrument 70 was separated from the printer body 60. It is natural that printing may be conducted with the wavefront-aberration measuring instrument 70 attached on the printer body 60.

[0165]

Meanwhile, the embodiments explained the cases with the scanning lithographic printer. However, the invention is applicable to any of a step-and-repeat apparatus, a step-and-scan apparatus and a step-and-switching apparatus provided that a lithographic printer having a projection optical system.

[0166]

Meanwhile, in the embodiments, the invention was applied to the aberration measurement in a lithographic printer's projection optical system. However, the invention is applicable to the measurement of aberrations in a focus optical system of an apparatus in other type without limited to the lithographic printer.

[0167]

Furthermore, the invention is applicable to the measurement of optical characteristics of various optical systems, e.g. reflection mirror form, that is other than the aberration measurement in an optical system.

[0168]

Device Manufacture

Explanation is made on the device manufacture using the lithographic printer of the embodiment.

[0169]

Fig. 18 shows a flowchart to produce a device (a semiconductor chip such as an IC or an LSI, a liquid-crystal panel, a CCD, a thin-film magnetic head, a micro-machine, or the like). As shown in Fig. 18, at step 201 (design step), device functional design (e.g. semiconductor device circuit design) is made, to make a pattern design for realizing the function. Subsequently, at step 202 (mask fabrication step), a mask is fabricated formed with the circuit pattern designed. Meanwhile, at step 203 (wafer making step), a wafer is made by use of a material such as silicon.

[0170]

Then, at step 204 (wafer process step), an actual circuit, etc. is formed on the wafer by the lithography technique with use of the mask and wafer prepared at the steps 201 - 203. Then, at step 205 (device assembling step), the wafer processed at the step 204 is made into chips. At the step 205, there are included processes, such as assembly process (dicing, bonding) and a packaging process (chip seal).

[0171]

Finally, at step 206 (test step), tests such as operation confirm test and durability test are conducted on the device

fabricated at the step 205. After passing the processes, a device is completed, which is shipped.

[0172]

Fig. 19 shows a detailed flow example of the step 204 for a semiconductor device. In Fig. 19, oxidation is made on a wafer surface at step 211 (oxidation step). At step 212 (CVD step), an insulation film is formed over the wafer surface. At step 213 (electrode forming step), electrodes are formed over the wafer by evaporation. At step 214 (ion implant step), ion is implanted to the wafer. The steps 211 - 214 constitute a former half process, to be executed with a selection in accordance with the process required in each stage.

[0173]

When the former half process ends in the stages of wafer process, the latter half process is executed as in the following. In the latter half process, a photosensitive agent is applied to the wafer at step 215 (resist forming step). Subsequently, at step 216 (printing step), the on-mask circuit pattern is printed onto the wafer by the lithographic printer according to the embodiment explained above. Then, at step 217 (development step), development is made on the wafer exposed to radiation. Subsequently, at step 218 (etching step), the exposed member is removed by etching, in an area other than the areas where the resist remains. At step 219 (resist removal step), the resist made unnecessary, after etching, is

removed away.

[0174]

By repeating the former half and latter half processes, circuit patterns are formed overlying the wafer.

[0175]

In the above manner, a device is manufactured formed with a precise pattern with accuracy.

[0176]

[Effect of the Invention]

As explained in detail above, according to the position detecting method of the invention, spot-image position can be detected with swiftness and accuracy even where there are a small number of pixels in a spot image.

[0177]

Meanwhile, the position detecting device of the invention detects a spot-image position by utilization of the position detecting method of the invention. Accordingly, spot-image position can be detected with swiftness and accuracy even where there are a small number of pixels in a spot image.

[0178]

Meanwhile, the optical-characteristic measuring method in the invention detects a plurality of spot-image formed position, reflecting thereon the optical characteristic of a detecting optical system, by means of the position detecting

method of the invention, and to measure an optical characteristic of the detecting optical system depending upon a plurality of pattern positions detected. Accordingly, the optical characteristic of the detecting optical system can be detected with swiftness and accuracy.

[0179]

Meanwhile, the optical-characteristic measuring instrument of the invention measures an optical characteristic of the measuring optical system by use of the optical-characteristic measuring method of the invention. Accordingly, the optical characteristic of the optical detecting system can be detected with swiftness and accuracy.

[0180]

Meanwhile, the lithographic printer of the invention has an optical-characteristic measuring instrument of the invention for measuring an optical characteristic of a projection optical system. Accordingly, the optical characteristic can be measured by the optical-characteristic measuring instrument. By using the projection optical system ensured the optical characteristic is well adjusted, a predetermined pattern can be transferred onto a substrate.

[0181]

Meanwhile, the device-manufacturing method of the invention is to transfer a predetermined pattern onto a substrate in a lithography process by use of the printing method

of the invention. Accordingly, a device can be manufactured formed accurately with a precise pattern.

[Brief Description of the Drawings]

[Fig. 1] is a figure schematically showing a configuration of a lithographic printer according to a first embodiment of the invention.

[Fig. 2] is a figure schematically showing a structure of a Fig. 1 wavefront sensor in Fig. 1.

[Fig. 3] is a figure for explaining the state of the surface of a Fig. 2 label plate.

[Fig. 4] Figs. 4(a) and 4(B) are figures showing a structure of a Fig. 2 microlens array.

[Fig. 5] is a block diagram showing a configuration of a Fig. 1 main control system.

[Fig. 6] is a flowchart for explaining the process in printing operation according to Fig. 1 apparatus.

[Fig. 7] is a flowchart for explaining the process in a Fig. 6 aberration measurement subroutine.

[Fig. 8] is a figure showing a measuring pattern example formed on a reticle-for-measurement.

[Fig. 9] is a view for explaining an optical arrangement in wavefront-aberration measurement.

[Fig. 10] Figs. 10(A) and 10(B) are figures (1/4) for explaining the principle of spot-image position detection in

a first embodiment.

[Fig. 11] Figs. 11(A) and 11(B) are figures (2/4) for explaining the principle of spot-image position detection in the first embodiment.

[Fig. 12] Figs. 12(A) and 12(B) are figures (3/4) for explaining the principle of spot-image position detection in the first embodiment.

[Fig. 13] is a figure (4/4) for explaining the principle of spot-image position detection in the first embodiment.

[Fig. 14] is a flowchart for explaining a process in Fig. 7 spot-image position detecting subroutine.

[Fig. 15] Figs. 15(A) and 15(B) are figures for explaining a spot image taken and analytic data distribution in the first embodiment.

[Fig. 16] is a figure for explaining a modification.

[Fig. 17] Figs. 17(A) - 17(D) are figures for explaining a spot image taken and analytic data distribution in the first embodiment.

[Fig. 18] is a flowchart for explaining a device-manufacturing method using the lithographic printer according to the first and second embodiments.

[Fig. 19] is a flowchart of a process in a Fig. 18 wafer process step.

[Description of Reference Numerals and Signs]

32 ... position detecting device, 33 ...

wavefront-aberration calculating device
 (optical-characteristic calculating device), 34 ...
 data-distribution preparing device (preparing device), 35 ...
 determining device, 36 ... estimated-position calculating
 device, 37 ... spot-image position calculating device, 60 ...
 printer body, 90 ... wavefront-aberration measuring
 instrument (optical-characteristic measuring instrument),
 94 ... microlens array (wavefront split device), 94a ...
 microlens (lens element), 95 ... CCD (imaging device), PL ...
 projection optical system (detecting optical system), W ...
 wafer (substrate).

[Fig. 1]

20. Main control system

[Fig. 6]

Start

101. Measure wavefront aberration through projection optical system PL

102. Wavefront aberration equal to or smaller than permissible value?

103. Adjust wavefront aberration

104. Load reticle R, wafer W

105. Printing-preparing operation

106. Printing

107. Unload wafer W

End

[Fig. 7]

Start

111. Load reticle-to-measure RT

112. Move wavefront sensor 90 to first measuring position

113. Imaging

114. Detect spot image position

115. Calculate wavefront aberration

116. Wavefront-aberration measurement completed on all pinhole patterns?

117. Move wavefront sensor 90 to next measuring position

Return

[Fig. 14]

Start

121. Extract first spot image region

122. Prepare analytic data distribution

123. Determine odd and even numbers for use in positional
detection

124. Calculate estimated position

125. Detect spot image position

126. All spot image positions detected?

127. Extract next spot image region

Return

[Fig. 18]

201. Design (function, performance, pattern)

202. Mask fabrication

203. Wafer making

204. Wafer process

205. Device assembly

206. Examination

[Fig. 19]

211. Oxidation

- 213. Electrode forming
- 214. Ion implant
- 215. Resist forming
- 216. Exposure
- 217. Development
- 218. Etching
- 219. Resist removal
 - A. Former-half process
 - B. Latter-half process

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2002-202221
(P2002-202221A)

(43)公開日 平成14年7月19日(2002.7.19)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード*(参考)
G 0 1 M 11/02		C 0 1 M 11/02	B 2 F 0 6 J
G 0 1 B 11/00		C 0 1 B 11/00	H 2 G 0 8 6
G 0 3 F 7/22		C 0 3 F 7/22	H 5 F 0 4 6
H 0 1 L 21/027		H 0 1 L 21/30	5 1 6 A

審査請求 未請求 請求項の数24 O L (全 24 頁)

(21)出願番号 特願2000-400851(P2000-400851)

(22)出願日 平成12年12月28日(2000.12.28)

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 朱 郁葱

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株
式会社ニコン内

(72)発明者 藤井 透

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株
式会社ニコン内

(74)代理人 100102901

弁理士 立石 篤司

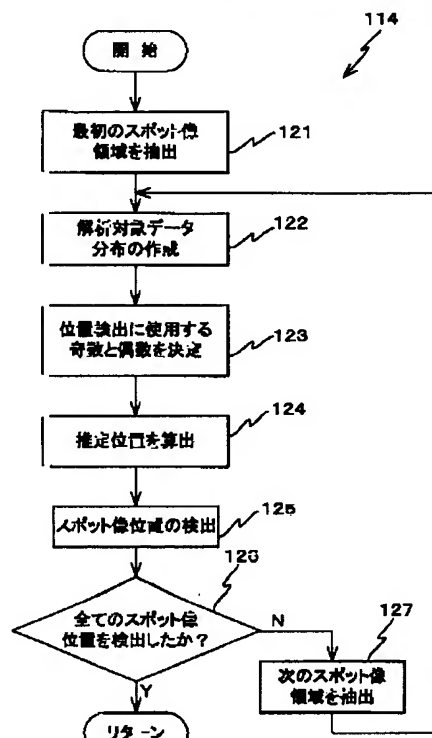
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 位置検出方法、位置検出装置、光学特性測定方法、光学特性測定装置、露光装置、及びデバイス製造方法

(57)【要約】

【課題】 スポット像の位置を精度良く検出する。

【解決手段】 撮像結果から解析対象データ分布を作成する(ステップ122)とともに、解析対象データ分布に関する解析幅を規定する奇数及び偶数を含む数を決定する(ステップ123)。引き続き、決定された奇数で規定される解析幅による解析対象データ分布に関する所定のアルゴリズムによる解析によって第1推定位置を求めるとともに、決定された偶数で規定される解析幅による解析対象データ分布に関する所定のアルゴリズムによる解析によって第2推定位置を求める(ステップ124)。そして、第1推定位置及び第2推定位置、並びに所定のアルゴリズムの性質に基づいて、スポット像位置を検出する(ステップ125)。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 撮像されたスポット像の位置を検出する位置検出方法であって、

前記スポット像の撮像結果における画素データから解析対象データ分布を作成する第1工程と；前記スポット像の所定方向に関する位置の検出にあたり使用する、前記解析用データ分布に関する解析幅を規定する数として、奇数である第1の数及び偶数である第2の数を少なくとも含む複数の数を決定する第2工程と；前記複数の数の中で奇数である数それぞれについて、前記解析対象データ分布において最大値となる第1画素位置を中心として、前記所定方向に並ぶ前記奇数である数の画素位置のデータに基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する少なくとも1つの第1推定位置を求める第3工程と；前記複数の数の中で偶数である数それぞれについて、前記解析対象データ分布において、前記第1画素位置と、前記所定方向で前記第1画素位置と隣り合う2つの画素位置の内より大きなデータ値となっている第2画素位置との境界を中心として、前記所定方向に並ぶ前記偶数である数の画素位置のデータに基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する少なくとも1つの第2推定位置を求める第4工程と；前記第1推定位置及び前記第2推定位置に基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する位置を求める第5工程と；を含む位置検出方法。

【請求項2】 前記解析対象データ分布は、前記所定方向と直交する方向に関する位置が異なる複数の前記所定方向に沿った画素列の和をとって得られるデータ分布であることを特徴とする請求項1に記載の位置検出方法。

【請求項3】 前記複数の数それぞれは、前記スポット像の画素データ分布において所定値以上の画素データが前記所定方向に沿って連続して並ぶ数の最大数以下であることを特徴とする請求項2に記載の位置検出方法。

【請求項4】 前記解析対象データ分布は、所定値以上の画素データについて、前記所定方向と直交する方向に関する位置が異なる複数の前記所定方向に沿った画素列の和をとって得られるデータ分布であることを特徴とする請求項1に記載の位置検出方法。

【請求項5】 前記複数の数それぞれは、前記スポット像の画素データ分布において前記所定値以上の画素データが所定方向に沿って連続して並ぶ数の最大数以下であることを特徴とする請求項4に記載の位置検出方法。

【請求項6】 前記第1の数は、前記最大数に最も近い奇数であり、前記第2の数は、前記最大数と最も近い偶数であることを特徴とする請求項3又は5に記載の位置検出方法。

【請求項7】 前記複数の数は、1つの奇数及び1つの偶数であることを特徴とする請求項1～6のいずれか一項に記載の位置検出方法。

【請求項8】 前記第5工程では 前記第1推定位置

前記第2推定位置、及び前記第1推定位置と前記第2推定位置との平均位置の中で、推定誤差が最も小さくなる位置を前記スポット像の所定方向に関する位置として求めることを特徴とする請求項7に記載の位置検出方法。

【請求項9】 前記第5工程では、前記第1推定位置と前記第2推定位置との重み付け平均値を求めることにより、前記スポット像の所定方向に関する位置を求めることを特徴とする請求項7に記載の位置検出方法。

【請求項10】 前記解析対象データ分布は、少なくとも1つの前記所定方向に沿った画素列に関する個別列データ分布であり、

前記複数の数は、前記個別列データ分布ごとに決定され、

前記第5工程では、前記個別列データ分布ごとに求められた前記第1推定位置及び前記第2推定位置に基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する位置を求めることを特徴とする請求項1に記載の位置検出方法。

【請求項11】 前記個別列データ分布それぞれに関する前記複数の数それぞれは、前記個別列データ分布それぞれにおいて所定値以上の画素データが前記所定方向に沿って連続して並ぶ配列数以下であることを特徴とする請求項10に記載の位置検出方法。

【請求項12】 前記個別列データ分布それぞれにおいて、前記第1の数は、前記配列数に最も近い奇数であり、前記第2の数は、前記配列数と最も近い偶数であることを特徴とする請求項11に記載の位置検出方法。

【請求項13】 前記複数の数は、1つの奇数及び1つの偶数であることを特徴とする請求項10～12のいずれか一項に記載の位置検出方法。

【請求項14】 前記第5工程は、前記個別列データ分布ごとの第1推定位置及び前記第2推定位置に基づいて、前記個別列データ分布ごとの個別推定位置を求める第6工程と；前記個別列データ分布ごとの個別推定位置に基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する位置を求める第7工程と；とを含むことを特徴とする請求項10～13のいずれか一項に記載の位置検出方法。

【請求項15】 前記第7工程では、前記個別推定値ごとの統計的な信頼度に応じて前記個別推定値の重み付け平均を求めることにより、前記スポット像の前記所定方向に関する位置を求めることを特徴とする請求項14に記載の位置検出方法。

【請求項16】 前記推定位置の算出は、重心法により行われることを特徴とする請求項1～15のいずれか一項に記載の位置検出方法。

【請求項17】 撮像されたスポット像の位置を検出する位置検出装置であって、

前記スポット像の撮像結果における画素データから解析対象データ分布を作成する作成装置と；前記スポット像の所定方向に関する位置の検出にあたり使用する 前記

解析用データ分布に関する解析幅を規定する数として、奇数である第1の数及び偶数である第2の数を少なくとも含む複数の数を決定する決定装置と；前記複数の数の中で奇数である数それぞれについて、前記解析対象データ分布において最大値となる第1画素位置を中心として、前記所定方向に並ぶ前記奇数である数の画素位置のデータに基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する少なくとも1つの第1推定位置を算出するとともに、前記複数の数の中で偶数である数それぞれについて、前記解析対象データ分布において、前記第1画素位置と、前記所定方向で前記第1画素位置と隣り合う2つの画素位置の内より大きなデータ値となっている第2画素位置との境界を中心として、前記所定方向に並ぶ前記偶数である数の画素位置のデータに基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する少なくとも1つの第2推定位置を算出する推定位置算出装置と；前記第1推定位置及び前記第2推定位置に基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する位置をスポット位置算出装置と；を備える位置検出装置。

【請求項18】 被検光学系の光学特性を測定する光学特性測定方法であって、前記被検光学系を介した光を波面分割し、複数のスポット像を形成する像形成工程と；前記複数のスポット像を撮像する撮像工程と；前記撮像工程において撮像された前記複数のスポット像それぞれの位置を、請求項1～16のいずれか一項に記載の位置検出方法を使用して検出する位置検出工程と；前記位置検出工程において検出された前記複数のスポット像の位置に基づいて、前記被検光学系の光学特性を算出する光学特性算出工程と；を含む光学特性測定方法。

【請求項19】 前記光学特性は波面収差であることを特徴とする請求項18に記載の光学特性測定方法。

【請求項20】 被検光学系の光学特性を測定する光学特性測定装置であって、前記被検光学系を介した光を波面分割し、複数のスポット像を形成する像を形成する波面分割素子と；前記複数のスポット像を撮像する撮像装置と；前記撮像装置によって撮像された前記複数のスポット像それぞれの位置を検出する請求項17に記載の位置検出装置と；前記位置検出装置により検出された複数のスポット像の位置に基づいて、前記被検光学系の光学特性を算出する光学特性算出装置と；を備える光学特性測定装置。

【請求項21】 前記波面分割素子は、レンズ要素が2次元的に配列されたマイクロレンズアレイであることを特徴とする請求項20に記載の光学特性測定装置。

【請求項22】 露光光を基板に照射することにより、所定のパターンを前記基板に転写する露光装置であって、露光光の光路上に配置された投影光学系を有する露光装置本体と；前記投影光学系を被検光学系とする請求項2

0又は21に記載の光学特性測定装置と；を備える露光装置。

【請求項23】 前記光学特性測定装置は、前記露光装置本体に対して着脱可能であることを特徴とする請求項22に記載の露光装置。

【請求項24】 リソグラフィ工程を含むデバイス製造方法において、前記リソグラフィ工程で、請求項22又は23に記載の露光装置を用いて露光を行うことを特徴とするデバイス製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、位置検出方法、位置検出装置、光学特性測定方法、光学特性測定装置、露光装置、及びデバイス製造方法に係り、より詳しくは、所定の光学系によって形成されたスポット像の位置を検出する位置検出方法及び位置検出装置、当該位置検出方法を使用して被検光学系の光学特性を測定する光学特性測定方法及び光学特性測定装置、並びに該光学特性測定装置を備える露光装置、該露光装置を使用するデバイス製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】従来より、半導体素子、液晶表示素子等を製造するためのリソグラフィ工程では、マスク又はレチクル（以下、「マスク」と総称する）に形成されたパターン（以下、「レチクルパターン」とも呼ぶ）を投影光学系を介してレジスト等が塗布されたウエハ又はガラスプレート等の基板（以下、適宜「基板」と総称する）上に転写する露光装置が用いられている。こうした露光装置としては、いわゆるステッパ等の静止露光型の露光装置や、いわゆるスキャニング・ステッパ等の走査露光型の露光装置が主として用いられている。

【0003】かかる露光装置においては、レチクルに形成されたパターンを基板に、高い解像力で、忠実に投影する必要がある。このため、投影光学系は、諸収差が十分に抑制された良好な光学特性を有するように設計されている。

【0004】しかし、完全に設計どおりに投影光学系を製造することは困難であり、実際に製造された投影光学系には様々な要因に起因する諸収差が残存してしまう。このため、実際に製造された投影光学系の光学特性は、設計上の光学特性とは異なるものになってしまう。

【0005】そこで、実際に製造された投影光学系のような被検光学系の収差等の光学特性を測定するための様々な技術が提案されている。かかる様々な提案技術の中で、ピンホールを用いて発生させた球面波を被検光学系に入射し、被検光学系を通過した後のピンホール像を一旦平行光に変換して、その波面を複数の分割する。そして、その分割された波面ごとにスポット像を形成し、分割波面ごとのスポット像の形成位置に基づいて被検光学

系の波面収差を測定する波面収差測定技術が注目されている。

【0006】こうした波面収差測定装置は、例えば、入射光の波面を分割して分割波面ごとにスポット像を形成する波面分割素子として、平行光の理想波面と平行な2次元平面に沿って微小なレンズが多数配列されたマイクロレンズアレイを採用することにより、簡単に構成することができる。そして、マイクロレンズアレイが形成した多数のスポット像をCCD等の撮像素子によって撮像し、各スポット像の撮像波形の重心を重心法により求めたり、各スポット像の撮像波形とテンプレート波形との最大相関位置を相関法により求めたりしてスポット像位置を検出し、検出された各スポット像位置の設計位置からのズレから波面収差を求めている。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】上述の従来の技術で使われてきた重心法や相関法は、耐ノイズ性が高く、一般には優れた方法である。しかし、少ない画素数（例えば、有効画素数が5（行方向）×5（列方向）程度）、かつ、画素の大きさよりも遥かに小さな精度（例えば、画素の大きさの $1/100 \sim 1/1000$ 程度の精度）でスポット像の位置検出を行う場合には、必ずしも有効な方法とはいえなかった。

【0008】すなわち、従来の重心法では、原理的に所望の精度でスポット位置を検出することはできなかった。また、相関法では、非常に多く（ $100 \times 100 \sim 1000 \times 1000$ 程度）のテンプレート波形との相関演算を行うことが必要となるため、迅速な位置検出ができなかった。

【0009】しかしながら、近年における高集積化に伴う露光精度の向上の要請からは、投影光学系に関する上述の波面収差測定では、スポット像の画素数が少なく、かつ、画素の大きさよりも遥かに小さな精度によるスポット像の位置検出が求められている。

【0010】本発明は、かかる事情のもとでなされたものであり、その第1の目的は、スポット像の画素数が少ない場合であっても、スポット像の位置を迅速かつ精度良く検出することができる位置検出方法及び位置検出装置を提供することにある。

【0011】また、本発明の第2の目的は、被検光学系の光学特性を精度良く測定することができる光学特性測定方法及び光学特性測定装置を提供することにある。

【0012】また、本発明の第3の目的は、所定のパターンを基板に精度良く転写することができる露光装置を提供することにある。

【0013】また、本発明の第4の目的は、微細なパターンを有する高集積度のデバイスを生産することが可能なデバイス製造方法を提供することを目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】本発明者が研究の結果か

ら得た知見によれば、撮像されたスポット像の画素数が少ない場合に、重心法のようなアルゴリズムを使用すると、スポット像位置が所定方向の画素の中央付近にあるときは、使用する所定方向の画素数を奇数とすれば、非常に精度良くスポット像位置を検出することができる。一方、スポット像位置が画素の所定方向の辺縁付近にあるときは、使用する所定方向の画素数を偶数とすれば、非常に精度良くスポット像位置を検出することができる。しかし、その他のスポット像位置のときには、使用する画素数を奇数にしても、また、偶数にしても位置検出精度が低下する。そして、位置検出精度の低下の仕方は、採用した位置検出アルゴリズムにより様々な様相を呈する。例えば重心法の場合には、+側に誤差が発生するか、又は、-側に誤差が発生するかは、採用したアルゴリズムである重心法に使用する画素数を奇数としたときと、偶数にしたときとで反対となっている。本発明は、以上のような知見に基づいてなされたものである。

【0015】すなわち、本発明の位置検出方法は、撮像されたスポット像の位置を検出する位置検出方法であって、前記スポット像の撮像結果における画素データから解析対象データ分布を作成する第1工程と；前記スポット像の所定方向に関する位置の検出にあたり使用する、前記解析用データ分布に関する解析幅を規定する数として、奇数である第1の数及び偶数である第2の数を少なくとも含む複数の数を決定する第2工程と；前記複数の数の中で奇数である数それぞれについて、前記解析対象データ分布において最大値となる第1画素位置を中心として、前記所定方向に並ぶ前記奇数である数の画素位置のデータに基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する少なくとも1つの第1推定位置を求める第3工程と；前記複数の数の中で偶数である数それぞれについて、前記解析対象データ分布において、前記第1画素位置と、前記所定方向で前記第1画素位置と隣り合う2つの画素位置の内より大きなデータ値となっている第2画素位置との境界を中心として、前記所定方向に並ぶ前記偶数である数の画素位置のデータに基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する少なくとも1つの第2推定位置を求める第4工程と；前記第1推定位置及び前記第2推定位置に基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する位置を求める第5工程と；を含む位置検出方法である。ここで、「スポット」には、円形スポット、楕円スポット、矩形スポットが含まれる。本明細書では、かかる意味に「スポット」の用語を用いる。

【0016】これによれば、第1工程で撮像結果から作成された解析対象データ分布と、第2工程で決定された第1の数（奇数）及び第2の数（偶数）を含む複数の数とに基づいて、第3工程において、例えば重心法のような所定のアルゴリズムにより、複数の数の中の少なくとも1つの奇数について第1推定位置を求める。また、第4工程において 所定のアルゴリズムにより 複数の数

の中の少なくとも1つの偶数について第2推定位置を求める。そして、第5工程において、第1推定値及び第2推定値に基づき、第1推定値及び第2推定値を求めるのに使用した所定のアルゴリズムの性質を考慮して、スポット像の所定方向に関する位置を求める。

【0017】したがって、スポット像の画素数が少ない場合であっても、スポット像の位置を迅速かつ精度良く検出することができる。

【0018】本発明の位置検出方法では、前記解析対象データ分布を、(a) 前記所定方向と直交する方向に関する位置が異なる複数の前記所定方向に沿った画素列の和をとって得られるデータ分布とすることもできるし、また、(b) 所定値以上の画素データについて、前記所定方向と直交する方向に関する位置が異なる複数の前記所定方向に沿った画素列の和をとって得られるデータ分布としてもよい。ここで、「複数の所定方向に沿った画素列の和をとる」とは、複数の所定方向に沿った画素列において、所定方向の画素位置が同一の画素について画素データの和をとって、所定方向に沿ったデータ列を作成することをいう。

【0019】この場合、前記複数の数それぞれを、前記スポット像の画素データ分布において所定値以上の画素データが前記所定方向に沿って連続して並ぶ数の最大数以下とすることができる。そして、前記第1の数を前記最大数に最も近い奇数とし、前記第2の数を前記最大数に最も近い偶数とすることができる。

【0020】また、本発明の位置検出方法では、前記複数の数を1の奇数及び1つの偶数とすることができる。

【0021】この場合、前記第5工程において、(a) 前記第1推定位置、前記第2推定位置、及び前記第1推定位置と前記第2推定位置との平均位置の中で、推定誤差が最も小さくなる位置を前記スポット像の所定方向に関する位置として求めることもできるし、また、(b) 前記第1推定位置と前記第2推定位置との重み付け平均値を求めることにより、前記スポット像の所定方向に関する位置を求めることもできる。

【0022】また、本発明の位置検出方法では、前記解析対象データ分布を、少なくとも1つの前記所定方向に沿った画素列に関する個別列データ分布とし、前記複数の数を、前記個別列データ分布ごとに決定し、前記第5工程において、前記個別列データ分布ごとに求められた前記第1推定位置及び前記第2推定位置に基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する位置を求めることができる。

【0023】ここで、前記個別列データ分布それぞれに関する前記複数の数それぞれを、前記個別列データ分布それぞれにおいて所定値以上の画素データが前記所定方向に沿って連続して並ぶ配列数以下とすることができる。そして、前記個別列データ分布それぞれにおいて、前記第1の数を前記配列数に最も近い奇数とし、前記第

2の数を前記配列数と最も近い偶数とすることができる。

【0024】また、個別列データ分布を解析する場合には、前記第5工程が、前記個別列データ分布ごとの第1推定位置及び前記第2推定位置に基づいて、前記個別列データ分布ごとの個別推定位置を求める第6工程と；前記個別列データ分布ごとの個別推定位置に基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する位置を求める第7工程とを含むことができる。

【0025】ここで、前記第7工程において、前記個別推定値ごとの統計的な信頼度に応じて前記個別推定値の重み付け平均を求めることにより、前記スポット像の前記所定方向に関する位置を求めることができる。

【0026】本発明の位置検出装置は、撮像されたスポット像の位置を検出する位置検出装置であって、前記スポット像の撮像結果における画素データから解析対象データ分布を作成する作成装置(34)と；前記スポット像の所定方向に関する位置の検出にあたり使用する、前記解析用データ分布に関する解析幅を規定する数として、奇数である第1の数及び偶数である第2の数を少なくとも含む複数の数を決定する決定装置(35)と；前記複数の数の中で奇数である数それぞれについて、前記解析対象データ分布において最大値となる第1画素位置を中心として、前記所定方向に並ぶ前記奇数である数の画素位置のデータに基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する少なくとも1つの第1推定位置を算出するとともに、前記複数の数の中で偶数である数それぞれについて、前記解析対象データ分布において、前記第1画素位置と、前記所定方向で前記第1画素位置と隣り合う2つの画素位置の内より大きなデータ値となっている第2画素位置との境界を中心として、前記所定方向に並ぶ前記偶数である数の画素位置のデータに基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する少なくとも1つの第2推定位置を算出する推定位置算出装置(36)と；前記第1推定位置及び前記第2推定位置に基づいて、前記スポット像の前記所定方向に関する位置をスポット位置算出装置(37)と；を備える位置検出装置である。

【0027】これによれば、撮像装置の撮像結果から作成装置によって作成された解析対象データ分布と、決定装置によって決定された第1の数(奇数)及び第2の数(偶数)とを含む複数の数に基づいて、推定位置算出装置が、例えば重心法のような所定のアルゴリズムにより第1推定位置及び第2推定位置を求める。そして、スポット位置算出装置が、第1推定値及び第2推定値に基づき、第1推定値及び第2推定値を求めるのに使用した所定のアルゴリズムの性質を考慮して、スポット像の所定方向に関する位置を求める。すなわち、本発明の位置検出方法を使用して、スポット像位置を検出する。したがって、スポット像の画素数が少ない場合であっても、ス

ポット像の位置を迅速かつ精度良く検出することができる。

【0028】本発明の光学特性測定方法は、被検光学系（PL）の光学特性を測定する光学特性測定方法であって、前記被検光学系を介した光を波面分割し、複数のスポット像を形成する像形成工程と；前記複数のスポット像を撮像する撮像工程と；前記撮像工程において撮像された前記複数のスポット像それぞれの位置を、本発明の位置検出方法を使用して検出する位置検出工程と；前記位置検出工程で検出された前記複数のスポット像の位置に基づいて、前記被検光学系の光学特性を算出する光学特性算出工程と；を含む光学特性測定方法である。

【0029】これによれば、像形成工程で像面に形成され、撮像工程で撮像された複数のスポット像それぞれの位置が、位置検出工程において、本発明の位置検出方法により精度良く検出される。こうして検出された複数のパターンの位置に基づいて、光学特性算出工程において、被検光学系の光学特性が算出される。したがって、被検光学系の光学特性を精度良く測定することができる。

【0030】なお、本発明の光学測定方法では、前記光学特性を波面収差とすることができる。

【0031】本発明の光学特性測定装置は、被検光学系（PL）の光学特性を測定する光学特性測定装置であって、前記被検光学系を介した光を波面分割し、複数のスポット像を形成する波面分割素子（94）と；前記複数のスポット像を撮像する撮像装置（95）と；前記撮像像値によって撮像された前記複数のスポット像それぞれの位置を、前記波面分割素子を所定の光学系とする本発明の位置検出装置（32）と；前記位置検出装置によって検出された前記複数のスポット像の位置に基づいて、前記被検光学系の光学特性を算出する光学特性算出装置（33）と；を備える光学特性測定装置である。

【0032】これによれば、波面分割素子によって形成された複数のスポット像が、撮像装置によって撮像される。引き続き、複数のスポット像の位置が、撮像結果から、本発明の位置検出方法を使用する位置検出装置により精度良く検出される。そして、光学特性算出装置が、検出された複数のスポット像の位置に基づいて、被検光学系の光学特性を算出する。すなわち、本発明の光学特性測定装置は、本発明の光学特性測定方法によって、被検光学系の光学特性を測定する。したがって、被検光学系の光学特性を精度良く測定することができる。

【0033】本発明の光学特性測定装置では、前記波面分割素子を、レンズ要素（94a）が2次元的に配列されたマイクロレンズアレイ（94）とする構成とすることができる。

【0034】本発明の露光装置は、露光光を基板（W）に照射することにより、所定のパターンを前記基板に転写する露光装置であって、露光光の光路上に配置された

投影光学系（PL）を有する露光装置本体（60）と；前記投影光学系を被検光学系とする本発明の光学特性測定装置と；を備える露光装置である。

【0035】これによれば、本発明の光学特性測定装置により精度良く光学特性が測定され、光学特性が良好に調整されていることが保証された投影光学系を使用して、所定のパターンを基板に転写することができる。したがって、所定のパターンを基板に精度良く転写することができる。

【0036】本発明の露光装置では、前記光学特性測定装置を前記露光装置本体に対して着脱可能に構成することができる。

【0037】本発明のデバイス製造方法は、リソグラフィ工程を含むデバイス製造方法において、前記リソグラフィ工程で、本発明の露光装置を使用して露光を行うことを特徴とするデバイス製造方法である。これによれば、本発明の露光装置を使用して露光を行うことにより、所定のパターンを精度良く区画領域に転写することができるので、微細な回路パターンを有する高集積度のデバイスの生産性を向上することができる。

【0038】

【発明の実施の形態】《第1の実施形態》以下、本発明の第1の実施形態を、図1～図15を参照して説明する。

【0039】図1には、本発明の一実施形態に係る露光装置100の概略構成が示されている。この露光装置100は、ステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置である。この露光装置100は、露光装置本体60と、光学特性測定装置としての波面収差測定装置70とを備えている。

【0040】前記露光装置本体60は、照明系10、レチクルRを保持するレチクルステージRST、被検光学系としての投影光学系PL、基板（物体）としてのウエハWが搭載されるステージ装置としてのウエハステージWST、アライメント顕微鏡AS、レチクルステージRST及びウエハステージWSTの位置及び姿勢を制御するステージ制御系19、並びに装置全体を統括制御する主制御系20等を備えている。

【0041】前記照明系10は、光源、フライアイレンズ等からなる照度均一化光学系、リレーレンズ、可変NDフィルタ、レチクルブラインド、及びダイクロイックミラー等（いずれも不図示）を含んで構成されている。こうした照明系の構成は、例えば、特開平10-112433号公報に開示されている。この照明系10では、回路パターン等が描かれたレチクルR上のレチクルブラインドで規定されたスリット状の照明領域部分を照明光ILによりほぼ均一な照度で照明する。

【0042】前記レチクルステージRST上にはレチクルRが、例えば真空吸着により固定されている。レチクルステージRSTは、ここでは、磁気浮上型の2次元リ

ニアアクチュエータから成る不図示のレチクルステージ駆動部によって、レチクルRの位置決めのため、照明系10の光軸（後述する投影光学系PLの光軸AXに一致）に垂直なXY平面内で微少駆動可能であるとともに、所定の走査方向（ここではY方向とする）に指定された走査速度で駆動可能となっている。さらに、本実施形態では上記磁気浮上型の2次元リニアアクチュエータはX駆動用コイル、Y駆動用コイルの他にZ駆動用コイルを含んでいるため、Z方向にも微小駆動可能となっている。

【0043】レチクルステージRSTのステージ移動面内の位置はレチクルレーザ干渉計（以下、「レチクル干渉計」という）16によって、移動鏡15を介して、例えば0.5～1 nm程度の分解能で常時検出される。レチクル干渉計16からのレチクルステージRSTの位置情報（又は速度情報）はステージ制御系19を介して主制御系20に送られ、主制御系20は、この位置情報（又は速度情報）に基づき、ステージ制御系19及びレチクルステージ駆動部（図示省略）を介してレチクルステージRSTを駆動する。

【0044】前記投影光学系PLは、レチクルステージRSTの図1における下方に配置され、その光軸AXの方向がZ軸方向とされている。投影光学系PLとしては、例えば両側テレセントリックな縮小系であり、共通のZ軸方向の光軸AXを有する不図示の複数のレンズエレメントから構成されている。また、この投影光学系PLとしては、投影倍率 β が例えば $1/4$ 、 $1/5$ 、 $1/6$ などのものが使用されている。このため、上述のようにして、照明光（露光光）ILによりレチクルR上の照明領域が照明されると、そのレチクルRに形成されたパターンが投影光学系PLによって投影倍率 β で縮小された像（部分倒立像）が表面にレジスト（感光剤）が塗布されたウエハW上のスリット状の露光領域に投影され転写される。

【0045】なお、本実施形態では、上記の複数のレンズエレメントのうち、特定のレンズエレメント（例えば、所定の5つのレンズエレメント）がそれぞれ独立に移動可能となっている。かかるレンズエレメントの移動は、特定レンズエレメントを支持するレンズ支持部材を支持し、鏡筒部と連結する、特定レンズごとに設けられた3個のピエゾ素子等の駆動素子によって行われるようになっている。すなわち、特定レンズエレメントを、それぞれ独立に、各駆動素子の変位量に応じて光軸AXに沿って平行移動させることもできるし、光軸AXと垂直な平面に対して所望の傾斜を与えることもできるようになっている。そして、これらの駆動素子に与えられる駆動指示信号が、主制御系20からの指令MCDに基づいて結像特性補正コントローラ51によって制御され、これによって各駆動素子の変位量が制御されるようになっている。

【0046】こうして構成された投影光学系PLでは、主制御系20による結像特性補正コントローラ51を介したレンズエレメントの移動制御により、ディストーション、像面湾曲、非点収差、コマ収差、又は球面収差等の光学特性が調整可能となっている。

【0047】前記ウエハステージWSTは、投影光学系PLの図1における下方で、不図示のベース上に配置され、このウエハステージWST上には、ウエハホルダ25が載置されている。このウエハホルダ25上にウエハWが例えば真空吸着等によって固定されている。ウエハホルダ25は不図示の駆動部により、投影光学系PLの光軸直交面に対し、任意方向に傾斜可能で、かつ投影光学系PLの光軸AX方向（Z方向）にも微動可能に構成されている。また、このウエハホルダ25は光軸AX回りの微小回転動作も可能になっている。

【0048】また、ウエハステージWSTの+Y方向側には、後述する波面センサ90を着脱可能とするためのブラケット構造が形成されている。

【0049】ウエハステージWSTは走査方向（Y方向）の移動のみならず、ウエハW上の複数のショット領域を前記照明領域と共役な露光領域に位置させることができるように、走査方向に垂直な方向（X方向）にも移動可能に構成されており、ウエハW上の各ショット領域を走査（スキャン）露光する動作と、次のショットの露光開始位置まで移動する動作とを繰り返すステップ・アンド・スキャン動作を行う。このウエハステージWSTはモータ等を含むウエハステージ駆動部24によりXY2次元方向に駆動される。

【0050】ウエハステージWSTのXY平面内での位置はウエハレーザ干渉計（以下、「ウエハ干渉計」という）18によって、移動鏡17を介して、例えば0.5～1 nm程度の分解能で常時検出されている。ウエハステージWSTの位置情報（又は速度情報）はステージ制御系19を介して主制御系20に送られ、主制御系20は、この位置情報（又は速度情報）に基づき、ステージ制御系19及びウエハステージ駆動部24を介してウエハステージWSTの駆動制御を行う。

【0051】前記アライメント顕微鏡ASは、投影光学系PLの側面に配置され、本実施形態では、ウエハW上に形成されたストリートラインや位置検出用マーク（ファインアライメントマーク）を観測する結像アライメントセンサから成るオフ・アクシス方式の顕微鏡が用いられている。このアライメント顕微鏡ASの詳細な構成は、例えば特開平9-219354号公報に開示されている。アライメント顕微鏡ASによる観測結果は、主制御系20に供給される。

【0052】更に、図1の装置には、ウエハW表面の露光領域内部及びその近傍の領域のZ方向（光軸AX方向）の位置を検出するための斜入射光式のフォーカス検出系（焦占検出系）の一つである 多占フォーカス位置

検出系(21, 22)が設けられている。この多点フォーカス位置検出系(21, 22)は、光ファイバ束、集光レンズ、パターン形成板、レンズ、ミラー、及び照射対物レンズ(いずれも不図示)から成る照射光学系21と、集光対物レンズ、回転方向振動板、結像レンズ、受光用スリット板、及び多数のフォトセンサを有する受光器(いずれも不図示)から成る受光光学系22とから構成されている。この多点フォーカス位置検出系(21, 22)の詳細な構成等については、例えば特開平6-283403号公報に開示されている。多点フォーカス位置検出系(21, 22)による検出結果は、ステージ制御系19に供給される。

【0053】前記波面収差測定装置70は、波面センサ90と、波面データ処理装置80とから構成されている。

【0054】前記波面センサ90は、図2に示されるように、標示板91、コリメータレンズ92、レンズ93a及びレンズ93bから成るリレーレンズ系93、波面分割素子としてのマイクロレンズアレイ94、並びに撮像装置としてのCCD95を備えており、この順序で光軸AX1上に配置されている。また、波面センサ90は、波面センサ90に入射した光の光路を設定するミラー96a, 96b, 96c、並びにコリメータレンズ92、リレーレンズ系93、マイクロレンズアレイ94、CCD95、及びミラー96a, 96b, 96cを収納する収納部材97を更に備えている。

【0055】前記標示板91は、例えばガラス基板を基材とし、ウエハホルダ25に固定されたウエハWの表面と同じ高さ位置(Z方向位置)に、光軸AX1と直交するように配置されている(図1参照)。この標示板91の表面には、図3に示されるように、その中央部に開口91aが形成されている。また、標示板91の表面における開口91aの周辺には、3組以上(図3では、4組)の2次元位置検出用マーク91bが形成されている。この2次元位置検出用マーク91bとしては、本実施形態では、X方向に沿って形成されたラインアンドスペースマーク91cと、Y方向に沿って形成されたラインアンドスペースマーク91dとの組合せが採用されている。なお、ラインアンドスペースマーク91c, 91dは、上述のアライメント顕微鏡ASによって観察可能となっている。また、開口91a及び2次元位置検出用マーク91bを除く標示板91の表面は反射面加工がなされている。かかる反射面加工は、例えば、ガラス基板にクロム(Cr)を蒸着することによって行われている。

【0056】図2に戻り、前記コリメータレンズ92は、開口91aを通して入射した光を平面波に変換する。

【0057】前記マイクロレンズアレイ94は、図4に示されるようにマトリクス状に正の屈折力を有する正

方形状の多数のマイクロレンズ94aが稠密に配列されたものである。ここで、各マイクロレンズ94aの光軸は互いにほぼ平行となっている。なお、図4においては、マイクロレンズ94aが7×7のマトリクス状に配列されたものが、一例として示されている。マイクロレンズ94aは、正形状に限らず長形状であってもよく、また、マイクロレンズ94aは、全てが同一形状でなくともよい。また、マイクロレンズアレイ94におけるマイクロレンズ94aの配列は、不等ピッチ配列でもよいし、また、斜め並び配列であってもよい。

【0058】こうしたマイクロレンズアレイ94は、平行平面ガラス板にエッチング処理を施すことにより作成される。マイクロレンズアレイ94は、リレーレンズ系93を介した光を入射したマイクロレンズ94aごとに、開口91aの像をそれぞれ異なる位置に結像する。

【0059】なお、コリメータレンズ92、リレーレンズ系93、マイクロレンズアレイ94、及びミラー96a, 96b, 96cから成る光学系を、以下では「波面収差測定光学系」というものとする。

【0060】図2に戻り、前記CCD95は、マイクロレンズアレイ94の各マイクロレンズ94aによって開口91aに形成された後述するピンホールパターンの像が結像される結像面、すなわち、波面収差測定光学系における開口91aの形成面の共役面に受光面を有し、その受光面に結像された多数のピンホールパターンの像を撮像する。この撮像結果は、撮像データIMDとして波面データ処理装置80に供給される。

【0061】前記収納部材97は、その内部に、コリメータレンズ92、リレーレンズ系93、マイクロレンズアレイ94、及びCCD95をそれぞれ支持する不図示の支持部材を有している。なお、ミラー96a, 96b, 96cは、収納部材97の内面に取り付けられている。また、前記収納部材97の外形は、上述したウエハステージWSTのブラケット構造と嵌合する形状となっており、ウエハステージWSTに対して着脱自在となっている。

【0062】前記波面データ処理装置80は、図5に示されるように、主制御装置30と記憶装置40とを備えている。主制御装置30は、(a)波面データ処理装置80の動作全体を制御するとともに、波面測定結果データWFAを主制御系20へ供給する制御装置39と、

(b)波面センサ90からの撮像データIMDを収集する撮像データ収集装置31と、(c)像データに基づいてスポット像の位置を検出する位置検出装置32と、

(d)位置検出装置32により検出されたスポット像位置に基づいて、投影光学系PLの波面収差を算出する波面収差算出装置33とを含んでいる。

【0063】ここで、前記位置検出装置32は、(i)撮像された結果に基づいて、各スポット像について、X方向及びY方向それぞれに関する解析対象データ分布を

作成する作成装置としてのデータ分布作成装置34と、
 (ii) 解析対象データ分布それぞれについて、奇数と偶数とからなる一対の数を決定する決定装置35と、(iii) X方向に関する解析対象データ分布及びこれに応じた一対の数に基づいて、第1推定X位置及び第2推定X位置を算出するとともに、Y方向に関する解析対象データ分布及びこれに応じた一対の数に基づいて、第1推定Y位置及び第2推定Y位置を算出する推定位置算出装置36と、(iv) 第1推定X位置及び第2推定X位置からスポット像X位置を算出するとともに、第1推定Y位置及び第2推定Y位置からスポット像Y位置を算出するスポット像位置算出装置37とを有している。

【0064】また、記憶装置40は、(a) 撮像データを格納する撮像データ格納領域41と、(b) 解析対象データ分布を格納するデータ分布格納領域42と、(c) 解析範囲の幅を規定する数を格納する解析幅格納領域43と、(d) 算出された推定位置を格納する推定位置格納領域44と、(e) 算出されたスポット像位置を格納するスポット像位置格納領域45と、(f) 波面収差データを格納する波面収差データ格納領域46とを有している。

【0065】本実施形態では、波面データ処理装置80を上記のように、各種の装置を組み合わせる構成したが、波面データ処理装置80を計算機システムとして構成し、主制御装置30を構成する上記の各装置の機能を波面データ処理装置80に内蔵されたプログラムによって実現することも可能である。

【0066】以下、本実施形態の露光装置100による露光動作を、図6に示されるフローチャートに沿って、適宜他の図面を参照しながら説明する。

【0067】なお、以下の動作の前提として、波面センサ90はウエハステージWSTに装着されており、また、波面データ処理装置80と主制御系20とが接続されているものとする。

【0068】また、ウエハステージに装着された波面センサ90の標示板91の開口91aとウエハステージWSTとの位置関係は、2次元位置マーク91bをアライメント顕微鏡ASで観察することにより、正確に求められているものとする。すなわち、ウエハ干渉計18から出力される位置情報(速度情報)に基づいて、開口91aのXY位置が正確に検出でき、かつ、ウエハステージ駆動部24を介してウエハステージWSTを移動制御することにより、開口91aを所望のXY位置に精度良く位置決めできるものとする。なお、本実施形態では、開口91aとウエハステージWSTとの位置関係は、アライメント顕微鏡ASによる4つの2次元位置マーク91bの位置の検出結果に基づいて、特開昭61-44429号公報等に開示されているいわゆるエンハンストグローバルアライメント(以下、「EGA」という)等の統計的な手法を用いて正確に検出される。

【0069】図6に示される処理では、まず、サブルーチン101において、投影光学系PLの波面収差が測定される。この波面収差の測定では、図7に示されるように、まず、ステップ111において、不図示のレチクルロードにより、図8に示される波面収差測定用の測定用レチクルRTがレチクルステージRSTにロードされる。測定用レチクルRTには、図8に示されるように、複数個(図8では、9個)のピンホールパターンPH₁~PH_N(図8では、N=9)がX方向及びY方向に沿ってマトリクス状に形成されている。なお、ピンホールパターンPH₁~PH_Nは、図8において点線で示されるスリット状の照明領域の大きさの領域内に形成されている。

【0070】引き続き、ウエハステージWST上に配置された不図示の基準マーク板を使用したレチクルアライメントや、更にアライメント顕微鏡ASを使用したベースライン量の測定等が行われる。そして、収差測定が行われる最初のピンホールパターンPH₁が投影光学系PLの光軸AX上に位置するように、レチクルステージRSTを移動させる。かかる移動は、主制御系20が、レチクル干渉計16が検出したレチクルステージRSTの位置情報(速度情報)に基づいて、ステージ制御系19を介してレチクル駆動部を制御することにより行われる。

【0071】図7に戻り、次に、ステップ112において、波面センサ90の標示板91の開口91aが、ピンホールパターンPH₁の投影光学系PLに関する共役位置(ピンホールパターンPH₁の場合には、光軸AX上)にウエハステージWSTを移動させる。かかる移動は、主制御系20が、ウエハ干渉計18が検出したウエハステージWSTの位置情報(速度情報)に基づいて、ステージ制御系19を介してウエハステージ駆動部24を制御することにより行われる。この際、主制御系20は、多点フォーカス位置検出系(21, 22)の検出結果に基づいて、ピンホールパターンPH₁のピンホール像が結像される像面に波面センサ90の標示板91の上面を一致させるべく、ウエハステージ駆動部24を介してウエハステージWSTをZ軸方向に微少駆動する。

【0072】以上のようにして、最初のピンホールパターンPH₁からの球面波に関する投影光学系PLの波面収差測定のための光学的な各装置の配置が終了する。こうした、光学的配置について、波面センサ90の光軸AX1及び投影光学系PLの光軸に沿って展開したものが、図9に示されている。

【0073】こうした光学配置において、照明系10から照明光ILが射出されると、測定用レチクルRTの最初のピンホールパターンPH₁に到達した光が、球面波となってピンホールパターンPHから出射する。そして、投影光学系PLを介した後、波面センサ90の標示板91の開口91aに集光される。なお、最初のピンホ

ールパターン PH_1 以外のピンホールパターン $PH_2 \sim PH_N$ を通過した光は、開口パターン 91 a には到達しない。こうして開口 91 a に集光された光の波面は、ほぼ球面ではあるが、投影光学系 PL の波面収差を含んだものとなっている。

【0074】開口 91 a を通過した光は、コリメータレンズ 92 により平行光に変換され、さらにリレーレンズ系 93 を介した後、マイクロレンズアレイ 94 に入射する。ここで、マイクロレンズアレイ 94 に入射する光の波面は、投影光学系 PL の波面収差を反映したものとなっている。すなわち、投影光学系 PL に波面収差が無い場合には、図 9 において点線で示されるように、その波面 WF が光軸 AX1 と直交する平面となるが、投影光学系 PL に波面収差が有る場合には、図 9 において二点鎖線で示されるように、その波面 WF' は位置に応じた角度で傾くことになる。

【0075】マイクロレンズアレイ 94 は、各マイクロレンズ 94 a ごとに、開口 91 a の像を、標示板 91 の共役面すなわち CCD 95 の撮像面に結像される。マイクロレンズ 94 a に入射した光の波面が光軸 AX1 と直交する場合には、そのマイクロレンズ 94 a の光軸と撮像面の交点を中心とするスポット像が、撮像面に結像される。また、マイクロレンズ 94 a に入射した光の波面が傾いている場合には、その傾き量に応じた距離だけ、そのマイクロレンズ 94 a の光軸と撮像面の交点からずれた点を中心とするスポット像が撮像面に結像される。

【0076】図 7 に戻り、次いで、ステップ 113 において、CCD 95 により、その撮像面に形成された像の撮像を行う。この撮像により得られた撮像データ IMD は、波面データ処理装置 80 に供給される。波面データ処理装置 80 では、撮像データ収集装置 31 が撮像データ IMD を収集し、撮像データ格納領域 41 に収集した撮像データを格納する。

【0077】次に、サブルーチン 114 において、撮像結果に基づいて、各スポット像の位置を検出する。

【0078】ここで、以下で行うスポット像位置検出の原理の概要について、図 10 (A) ～図 13 を参照して説明する。なお、説明の簡単のために、スポット像が 1 次元で分布している場合を例として、この位置検出の原理の概要を説明する。また、画素の幅は Δ であるとする。

【0079】上述のようにして、スポット像形成が行われたとき、一般に左右対称なスポット像 I (X) の中心位置 (以下、「スポット像位置」という) が、ある画素とそれに隣接する画素と境界位置 X_j であったときには、撮像結果として、その位置 X_j を中心として左右対称な画素データの分布となる。したがって、図 10 (A) に示されるように、スポット像位置 X_j 付近における偶数の画素 (図 10 (A) では、4 つの画素) に関する画素データの分布 (図 10 (A) において棒グラフ

表示されたデータ分布) について重心法によって算出される重心位置 X_0 が、スポット像位置 X_j と正確に一致する。しかし、図 10 (B) に示されるように、スポット像位置 X_j 付近における奇数の画素 (図 10 (B) では、5 つの画素) に関する画素データの分布 (図 10 (B) において棒グラフ表示されたデータ分布) について重心法によって算出される重心位置 X_0 は、スポット像位置 X_j とは異なる位置となる。

【0080】一方、スポット像 I (X) のスポット像位置が、ある画素の中心位置 ($X_j + \Delta/2$) であったときには、撮像結果として、その位置 ($X_j + \Delta/2$) を中心として左右対称な画素データの分布となる。したがって、図 11 (A) に示されるように、スポット像位置 ($X_j + \Delta/2$) 付近における奇数の画素 (図 11 (A) では、5 つの画素) に関する画素データの分布 (図 11 (A) において棒グラフ表示されたデータ分布) について重心法によって算出される重心位置 X_0 が、スポット像位置 ($X_j + \Delta/2$) と正確に一致する。しかし、図 11 (B) に示されるように、スポット像位置 ($X_j + \Delta/2$) 付近における偶数の画素 (図 11 (B) では、4 つの画素) に関する画素データの分布 (図 11 (B) において棒グラフ表示されたデータ分布) について重心法によって算出される重心位置 X_0 は、スポット像位置 ($X_j + \Delta/2$) とは異なる位置となる。

【0081】また、スポット像 I (X) のスポット像位置が、画素の境界位置 X_j でも、また、画素の中心位置 ($X_j + \Delta/2$) でもなく、位置 ($X_j + \Delta X$) ($\Delta X \neq 0, \Delta/2$) である場合には、図 12 (A) 及び図 12 (B) に示されるように、重心法で考慮されるスポット像位置 ($X_j + \Delta X$) 付近における画素の数を奇数 (図 12 (A) では、5 つ) にしても、また、偶数 (図 12 (B) では、4 つ) にしても、算出される重心位置 X_0 は、スポット像位置 ($X_j + \Delta X$) とは異なる位置となる。

【0082】以上に説明した、スポット像 I (X) のスポット像位置を位置 ($X_j + \Delta X$) としたときの、値 ΔX の変化 ($0 \leq \Delta X \leq \Delta$) による、偶数画素幅を解析幅としたときの重心法によるスポット像位置の算出結果の真のスポット像位置 ($X_j + \Delta X$) との誤差 $e E (\Delta X)$ (以下、「偶数重心誤差 $e E (\Delta X)$ 」という) の変化、及び奇数画素幅を解析幅としたときの重心法によるスポット像位置の算出結果の真のスポット像位置 ($X_j + \Delta X$) との誤差 $e O (\Delta X)$ (以下、「奇数重心誤差 $e O (\Delta X)$ 」という) の変化が、図 13 に示されている。この図 13 に示されるように、偶数誤差 $e E (\Delta X)$ は、 $\Delta X = 0$ において 0 であり、 ΔX が 0 から増加するにつれて、まずマイナス方向に増加し、 $\Delta X = (\Delta/2 - 0)$ でマイナス側の最大となる。そして、偶数誤差 $e E (\Delta X)$ は $\Delta X = (\Delta/2 + 0)$ でプラス側の

最大となり、その後 ΔX が増加するにつれて減少し、 $\Delta X = \Delta$ で再び0となる。一方、奇数誤差 $\varepsilon_O(\Delta X)$ は、 $\Delta X = 0$ においてプラス側の最大であり、 ΔX が0から増加するにつれて減少し、 $\Delta X = \Delta/2$ で0となる。その後、奇数誤差 $\varepsilon_O(\Delta X)$ は、 ΔX が増加するにつれてマイナス方向に増加し、 $\Delta X = \Delta$ でマイナス側の最大となる。

【0083】図13から判るように、偶数画素幅を解析幅とする重心法と奇数画素幅を解析幅とする重心法では、一方の位置検出精度が良い値 ΔX の範囲では、他方の位置検出精度が悪くなっている。すなわち、偶数重心誤差 $\varepsilon_E(\Delta X)$ の絶対値が小さくなる $\Delta X = 0$ 、 Δ の付近では、奇数重心誤差 $\varepsilon_O(\Delta X)$ の絶対値が大きくなっており、一方、奇数重心誤差 $\varepsilon_O(\Delta X)$ の絶対値が小さくなる $\Delta X = \Delta/2$ の付近では、偶数重心誤差 $\varepsilon_E(\Delta X)$ の絶対値が大きくなっている。

【0084】また、偶数重心誤差 $\varepsilon_E(\Delta X)$ 及び奇数重心誤差 $\varepsilon_O(\Delta X)$ の双方の絶対値がそれほど小さくない、 $\Delta X = 0$ と $\Delta X = \Delta/2$ との中間領域及び $\Delta X = \Delta/2$ と $\Delta X = \Delta$ との中間領域では、偶数重心誤差 $\varepsilon_E(\Delta X)$ と奇数重心誤差 $\varepsilon_O(\Delta X)$ との符号が互いに逆となっている。そこで、偶数画素幅を解析幅とする重心法による算出位置（以下、「偶数重心位置」という）と奇数画素幅を解析幅とする重心法による算出位置（以下、「奇数重心位置」という）との平均位置（以下、「偶奇平均位置」という）を考えると、偶奇平均位置の誤差 $\varepsilon_A(\Delta X)$ の絶対値は、図13に示されるように、 $\Delta X = 0$ と $\Delta X = \Delta/2$ との中間領域すなわち $\Delta X = \Delta X_1$ から $\Delta X = \Delta X_2$ までの領域、及び $\Delta X = \Delta/2$ と $\Delta X = \Delta$ との中間領域すなわち $\Delta X = \Delta X_3$ から $\Delta X = \Delta X_4$ までの領域において、偶数重心誤差 $\varepsilon_E(\Delta X)$ の絶対値や奇数重心誤差 $\varepsilon_O(\Delta X)$ の絶対値よりも小さくなる。

【0085】すなわち、偶数重心位置、奇数重心位置、及び偶奇平均位置は、それぞれが他の領域よりも誤差の小さな ΔX の範囲を有している。これを利用して、スポット像の偶数重心位置及び奇数重心位置をまず算出し、その算出結果から推定できる ΔX の値を図13の ΔX にあてはめる。引き続き、推定された ΔX が、 $0 \sim \Delta X_1$ 、 $\Delta X_1 \sim \Delta X_2$ 、 $\Delta X_2 \sim \Delta X_3$ 、 $\Delta X_3 \sim \Delta X_4$ 、 $\Delta X_4 \sim \Delta$ のどの範囲に入るかを判断する。そして、その判断結果に応じて、偶数重心位置、奇数重心位置、及び偶奇平均位置のうちで最も誤差が小さくなる位置をスポット像位置として採用することにより、スポット像位置の検出精度を、1つの解析画素幅を使用してスポット像位置を重心法で検出する場合よりも、大きく改善することができる。こうした検出精度の改善は、使用される解析画素幅が狭いほど大きくなる。

【0086】なお、 ΔX の変化に伴う偶数重心誤差 $\varepsilon_E(\Delta X)$ や奇数重心誤差 $\varepsilon_O(\Delta X)$ の変化の様子は

重心法において重心算出に使用されるデータ数によって変化する。したがって、偶数重心位置、奇数重心位置、及び偶奇平均位置それぞれが、それらのうちで最も誤差が小さくなる範囲は、重心法において重心算出に使用されるデータ数に応じて変化するが、簡単な計算によりその範囲を求めることができる。また、重心法において重心算出に使用されるデータ数の候補が予め分かっているならば、データ数ごとに上記の範囲をテーブルとして用意することができる。

【0087】以上説明したスポット像位置の検出原理に基づいて、本実施形態のサブルーチン114（図7参照）では、撮像結果に基づいて各スポット像の位置を検出する。

【0088】サブルーチン114では、図14に示されるように、まず、ステップ121において、位置検出装置32のデータ分布作成装置34が、撮像データ格納領域41から撮像データを読み出して、最初のスポット像（ $j = 1$ ）が形成されている領域を抽出する。かかる領域抽出にあたっては、データ分布作成装置34が、例えば、撮像データ画像における所定値以上のピーク値を有する2次元ピークを探索する。そして、探し出された複数の2次元ピークそれぞれがスポット像であるとして、データ分布作成装置34が最初のスポット像の領域を抽出する。こうして抽出されたスポット像領域 SPA_j が図15（A）に示されている。なお、図15（A）においては、スポット像領域 SPA_j が、X方向領域の最小値及びY方向領域の最小値 Y_j がであり、7画素（X方向） \times 7画素（Y方向）の正方形領域であった場合が示されている。また、図15においては、各画素 PX のX方向長さが Δ であり、また、Y方向長さが Δ であるものとしている。また、図15においては、撮像結果において、明るかった画素がクロスハッチで、暗かった画素が白抜きで、中間の明るさの画素がシングルハッチで表されている。

【0089】図14に戻り、次に、ステップ122において、データ分布作成装置34が、X方向の解析対象データ分布 $JX(X)$ 及びY方向の解析対象データ分布 $JY(Y)$ を作成する。かかる解析対象データ分布 $JX(X)$ 、 $JY(Y)$ の作成にあたり、データ分布作成装置34は、まず、所定の閾値以上の明るさであった画素を抽出する。なお、所定の閾値は、事前の計測又はシミュレーションにより求められた、ノイズ以外の信号成分を含んでいるとの判別が可能であると考えられる値に設定される。この結果、図15（A）におけるクロスハッチされた画素及びシングルハッチされた画素の画素データが抽出されたものとする。

【0090】引き続き、データ分布作成装置34は、抽出された画素データについて、X位置が同一の画素データの和を算出して解析対象データ分布 $JX(X)$ を作成する。こうして作成された解析対象データ分布 JX

(X) が、図15 (B) に示されている。また、データ分布作成装置34は、解析対象データ分布JX (X) の場合と同様にして、抽出された画素データについて、Y位置が同一の画素データの和を算出して解析対象データ分布JY (Y) を作成する。こうして、解析対象データ分布JX (X)、JY (Y) の作成にあたり、所定の閾値以上の明るさの画素データを使用するのは、解析対象データ分布JX (X)、JY (Y) へのノイズ成分の混入を極力防止するためである。

【0091】また、データ分布作成装置34は、抽出した画素データ分布における、X方向に沿った各画素列の画素数の最大数NX、及び、Y方向に沿った各画素列の画素数の最大数NYを求める。なお、図15 (A) の場合には、最大数NX=5及び最大数NY=5が求められる。

【0092】そして、データ分布作成装置34は、求められた解析対象データ分布JX (X)、JY (Y)、並びに最大数NX、NYをデータ分布格納領域42に格納する。

【0093】図14に戻り、次いで、ステップ123において、位置検出装置32の決定装置35が、データ分布格納領域42から最大数NX、NYを読み出し、スポット像のX位置検出において使用する、解析対象データ分布JX (X) の解析範囲を規定する1つの奇数NX1及び1つの偶数NX2を決定する。また、決定装置35は、スポット像のY位置検出において使用する、解析対象データ分布JY (X) の解析範囲を規定する1つの奇数NY1及び1つの偶数NY2を決定する。

【0094】ここで、画素数NXが奇数であったときには、数NX1を数NXに決定するとともに、数NX2を数(NX-1)に決定する。一方、画素数NXが偶数であったときには、数NX2を数NXに決定するとともに、数NX1を数(NX-1)に決定する。なお、図15 (A) に示される場合では、最大数NX=5なので、NX1=5及びNX2=4と決定される。

【0095】また、画素数NYが奇数であったときには、数NY1を数NYに決定するとともに、数NY2を数(NY-1)に決定する。一方、画素数NYが偶数であったときには、数NY2を数NYに決定するとともに、数NY1を数(NY-1)に決定する。なお、図15 (A) に示される場合では、最大数NY=5なので、NY1=5及びNY2=4と決定される。

【0096】そして、決定装置35が、決定された数NX1、NX2、NY1、NY2を解析幅格納領域43に格納する。

【0097】なお、数NX1、NX2を最大数NX以下の数としているのは、解析対象データ分布JX (X) の解析におけるノイズの影響を低減するためであり、また、数NX1、NX2を最大数NXに最も近い奇数及び偶数とするのは「データ数を極力多く確保し、重心法に

よる重心位置の算出によるスポット像の位置の推定精度を向上するためである。これと同様の理由により、数NY1、NY2を、最大数NY以下、かつ、最大数NYに最も近い奇数及び偶数としている。

【0098】図14に戻り、次に、ステップ124において、位置検出装置32の推定位置算出装置36が、データ分布格納領域42から解析対象データ分布JX (X)、JY (Y) を読み出すとともに、解析幅格納領域43から数NX1、NX2、NY1、NY2を読み出す。引き続き、推定位置算出装置36は、解析対象データ分布JX (X) 及び数NX1に基づいて、重心法により第1推定X位置X1を算出するとともに、解析対象データ分布JX (X) 及び数NX2に基づいて、重心法により第2推定X位置X2を算出する。

【0099】ここで、奇数NO (=NX1又はNX2) によって規定される解析幅、すなわち奇数NOの画素数のデータを使用する場合には、最大データの画素位置(以下、「最大データ画素位置」という)のデータと、最大データ画素位置の両側における((NO-1)/2)個ずつの画素位置のデータが使用される。そして、スポット像の推定X位置として、重心法により、NO個のデータの分布における重心位置(奇数重心位置)が算出される。例えば、図15 (B) のような解析対象データ分布JX (X) であり、NO=5の場合には、データD1~D5のすべてが使用されて、奇数重心位置が算出される。

【0100】一方、偶数NE (=NX1又はNX2) によって規定される解析幅、すなわち偶数NEの画素数のデータを使用する場合には、最大データ画素位置のデータと、最大データ画素位置の両隣における画素位置のデータのうちで、より大きなデータの画素位置と、これら2つの画素位置の左右における((NE-2)/2)個ずつの画素位置のデータが使用される。そして、スポット像の推定X位置として、重心法により、NE個のデータの分布における重心位置(偶数重心位置)が算出される。例えば、図15 (B) のような解析対象データ分布JX (X) であり、NO=4の場合には、データD1~D4が使用されて、偶数重心位置が算出される。

【0101】また、推定位置算出装置36は、解析対象データ分布JX (X) の場合と同様にして、解析対象データ分布JY (Y) 及び数NY1に基づいて、重心法により第1推定Y位置Y1を算出するとともに、解析対象データ分布JY (Y) 及び数NY2に基づいて、重心法により第2推定Y位置Y2を算出する。

【0102】そして、推定位置算出装置36は、第1推定X位置X1、第2推定X位置X2、第1推定Y位置Y1、及び第2推定Y位置Y2、並びに数NX1、NX2、NY1、NY2を推定位置格納領域44に格納する。

【0103】図14に戻り、次に、ステップ125にお

いて、位置検出装置32のスポット像位置算出装置37は、推定位置格納領域44から第1推定X位置X1、第2推定X位置X2、第1推定Y位置Y1、及び第2推定Y位置Y2、並びに数NX1、NX2、NY1、NY2を読み出し、スポット像のX位置及びY位置を算出する。かかるスポット像のX位置及びY位置の算出にあたって、スポット像位置算出装置37は、まず、第1推定X位置X1及び第2推定X位置X2から前述した ΔX を推定し、推定された ΔX が、図13における0 \sim ΔX_1 、 $\Delta X_1 \sim \Delta X_2$ 、 $\Delta X_2 \sim \Delta X_3$ 、 $\Delta X_3 \sim \Delta X_4$ 、 $\Delta X_4 \sim \Delta$ のどの範囲に入るかを判断する。引き続き、その判断結果に応じて、第1推定X位置X1、第2推定X位置X2、及び平均推定X位置XA ($= (X1 + X2) / 2$) のなかで、どのX推定位置が最も誤差が少なくなると考えられるものであるかを判定する。

【0104】そして、最も誤差が少なくなると考えられるX推定位置をスポット像のX位置として求める。引き続き、スポット像位置算出装置37は、第1推定Y位置Y1及び第2推定Y位置Y2、並びに数NY1、NY2に基づいて、第1推定Y位置Y1、第2推定Y位置Y2、及び平均推定Y位置YA ($= (Y1 + Y2) / 2$) のなかで、どのY推定位置が最も誤差が少なくなると考えられるものであるかを判定する。そして、最も誤差が少なくなると考えられるY推定位置をスポット像のY位置として求める。

【0105】スポット像位置算出装置37は、こうして求められたスポット像のX位置及びY位置をスポット像位置格納領域45に格納する。

【0106】図14に戻り、次に、ステップ126において、全てのスポット像の位置が検出されたか否かが判定される。この段階では、最初のスポット像の位置を検出しただけなので、否定的な判定がなされ、処理はステップ127に移行する。

【0107】ステップ127では、データ分布作成装置34が、次のスポット像が形成されている領域を抽出する。以後、ステップ126において肯定的な判定がなされるまで、ステップ122 \sim 127が繰り返され、上記の最初のスポット像位置の検出と同様にして、順次スポット像の位置が検出され、スポット像位置格納領域45に格納される。そして、ステップ126において肯定的な判定がなされると、サブルーチン114の処理を終了し、処理が図7のステップ115に移行する。

【0108】ステップ115では、波面収差算出装置33が、スポット像位置格納領域45からスポット像位置の検出結果を読み出して、測定用レチクルRTにおける最初のピンホールパターンPH₁を介した光に関する投影光学系PLの波面収差を算出する。かかる波面収差の算出は、波面収差が無いときに期待される各スポット像位置と、検出されたスポット像位置の差から、ツェルニケ多項式の係数を求めることにより行われる。こうし

て、算出された波面収差は、ピンホールパターンPH₁の位置とともに、波面収差データ格納領域46に格納される。

【0109】次に、ステップ116において、全てのピンホールパターンに関して投影光学系PLの波面収差を算出したか否かが判定される。この段階では、最初のピンホールパターンPH₁についてのみ投影光学系PLの波面収差を測定しただけなので、否定的な判定がなされ、処理はステップ117に移行する。

【0110】ステップ117では、波面センサ90の標示板91の開口91aが、次のピンホールパターンPH₂の投影光学系PLに関する共役位置にウエハステージWSTを移動させる。かかる移動は、主制御系20が、ウエハ干渉計18が検出したウエハステージWSTの位置情報(速度情報)に基づいて、ステージ制御系19を介してウエハステージ駆動部24を制御することにより行われる。なお、このときも、主制御系20が、多点フォーカス位置検出系(21, 22)の検出結果に基づいて、ピンホールパターンPH₂のピンホール像が結像される像面に波面センサ90の標示板91の上面を一致させるべく、必要に応じて、ウエハステージ駆動部24を介してウエハステージWSTをZ軸方向に微小駆動する。

【0111】そして、上記のピンホールパターンPH₁の場合と同様にして、投影光学系PLの波面収差が測定される。そして、波面収差の測定結果は、ピンホールパターンPH₂の位置とともに、波面収差データ格納領域44に格納される。

【0112】以後、上記と同様にして、全てのピンホールパターンに関する投影光学系PLの波面収差を順次測定され、開口パターンごとの測定結果が開口パターンの位置とともに、波面収差データ格納領域44に格納される。こうして全てのピンホールパターンに関する投影光学系PLの波面収差が測定されると、ステップ117において肯定的な判定がなされる。そして、制御装置39が、波面収差データ格納領域44から波面収差の測定結果を読み出し、波面測定結果データWFAとして主制御系20へ供給する。この後、処理が図6のステップ102に移行する。

【0113】ステップ102では、主制御系20が、制御装置39から供給された波面測定結果データWFAに基づいて、投影光学系PLの波面収差の測定が許容値以下であるか否かを判定する。この判定が肯定的である場合には、処理がステップ104に移行する。一方、判定が否定的である場合には、処理はステップ103に移行する。この段階では、判定が否定的であり、処理がステップ103に移行したとして、以下の説明を行う。

【0114】ステップ103では、主制御系20が、投影光学系PLの波面収差の測定結果に基づき、現在発生している波面収差を低減させるように、投影光学系PL

の波面収差の調整を行う。かかる波面収差の調整は、制御装置 39 が、結像特性補正コントローラ 51 を介してレンズエレメントの移動制御を行うことや、場合によっては、人手により投影光学系 PL のレンズエレメントの XY 平面内での移動やレンズエレメントの交換を行うことによりなされる。

【0115】引き続き、サブルーチン 101 において、調整された投影光学系 PL に関する波面収差が上記と同様にして測定される。以後、ステップ 102 において肯定的な判断がなされるまで、投影光学系 PL の波面収差の調整 (ステップ 103) と、波面収差の測定 (ステップ 101) が繰り返される。そして、ステップ 102 において肯定的な判断がなされると処理は、ステップ 104 に移行する。

【0116】ステップ 104 では、波面センサ 90 をウエハステージ WST から取り外し、波面データ処理装置 80 と主制御系 20 との接続を切断した後、主制御系 20 の制御のもとで、不図示のレチクルローダにより、転写したいパターンが形成されたレチクル R がレチクルステージ RST にロードされる。また、不図示のウエハローダにより、露光したいウエハ W がウエハステージ WST にロードされる。

【0117】次に、ステップ 105 において、主制御系 20 の制御のもとで、露光準備用計測が行われる。すなわち、ウエハステージ WST 上に配置された不図示の基準マーク板を使用したレチクルアライメントや、更にアライメント顕微鏡 AS を使用したベースライン量の測定等の準備作業が行われる。また、ウエハ W に対する露光が第 2 層目以降の露光であるときには、既に形成されている回路パターンと重ね合わせ精度良く回路パターンを形成するため、アライメント顕微鏡 AS を使用した上述の EGA 計測により、ウエハ W 上におけるショット領域の配列座標が高精度で検出される。

【0118】次いで、ステップ 106 において、露光が行われる。この露光動作にあたって、まず、ウエハ W の XY 位置が、ウエハ W 上の最初のショット領域 (ファースト・ショット) の露光のための走査開始位置となるように、ウエハステージ WST が移動される。ウエハ干渉計 18 からの位置情報 (速度情報) 等 (第 2 層目以降の露光の場合には、基準座標系と配列座標系との位置関係の検出結果、ウエハ干渉計 18 からの位置情報 (速度情報) 等) に基づき、主制御系 20 によりステージ制御系 19 及びウエハステージ駆動部 24 を介して行われる。同時に、レチクル R の XY 位置が、走査開始位置となるように、レチクルステージ RST が移動される。この移動は、主制御系 20 によりステージ制御系 19 及び不図示のレチクル駆動部等を介して行われる。

【0119】次に、ステージ制御系 19 が、主制御系 20 からの指示に応じて、多点フォーカス位置検出系 (21、22) によって検出されたウエハの Z 位置情報 (レ

チクル干渉計 16 によって計測されたレチクル R の XY 位置情報、ウエハ干渉計 18 によって計測されたウエハ W の XY 位置情報に基づき、不図示のレチクル駆動部及びウエハステージ駆動部 24 を介して、ウエハ W の面位置の調整を行いつつ、レチクル R とウエハ W とを相対移動させて走査露光を行う。

【0120】こうして、最初のショット領域の露光が終了すると、次のショット領域の露光のための走査開始位置となるように、ウエハステージ WST が移動されるとともに、レチクル R の XY 位置が、走査開始位置となるように、レチクルステージ RST が移動される。そして、当該ショット領域に関する走査露光が、上述の最初のショット領域と同様にして行われる。以後、同様にして各ショット領域について走査露光が行われ、露光が完了する。

【0121】そして、ステップ 107 において、不図示のアンローダにより、露光が完了したウエハ W がウエハホルダ 25 からアンロードされる。こうして、1 枚のウエハ W の露光処理が終了する。

【0122】以後のウエハの露光においては、ステップ 101~103 の投影光学系 PL に関する波面収差の測定及び調整が必要に応じて行われながら、ステップ 104~107 のウエハ露光作業が行われる。

【0123】以上説明したように、本実施形態によれば、奇数及び偶数からなる 1 対の数それぞれで定められる解析幅で、解析対象データ分布について重心法を適用し、スポット像の推定位置として、推定解析幅と奇数を使用したときの奇数重心位置、及び、解析幅と偶数を使用したときの偶数重心位置を算出する。そして、奇数重心位置及び偶数重心位置に基いて、重心法による誤差発生 の性質を考慮して、スポット像の位置を求める。したがって、スポット像の画素数が少ない場合であっても、スポット像の位置を迅速かつ精度良く検出することができる。

【0124】また、スポット像の位置検出に使用される解析対象データ分布の作成にあたって、ノイズレベルであると考えられる画素データを使用しないので、スポット像の位置を精度良く検出することができる。

【0125】また、信号成分が含まれると考えられるデータを最大限使用して、解析対象データ分布を作成しているので、スポット像の位置を精度良く検出することができる。

【0126】また、奇数重心位置、偶数重心位置、及び平均重心位置のうちで、最も誤差が小さいと考えられる推定位置を求めることにより、スポット像の位置を検出しているので、スポット像の位置を迅速かつ精度良く検出することができる。

【0127】また、精度良く求められたスポット像位置を用いて投影光学系 PL の波面収差を算出するので、投影光学系 PL の波面収差を精度良く求めることができ

る。

【0128】また、精度良く求められた投影光学系PLの波面収差に基づいて、投影光学系PLの収差を調整し、十分に諸収差が低減された投影光学系PLによりレチクルRに形成された所定のパターンがウエハW表面に投影されるので、所定のパターンをウエハWに精度良く転写することができる。

【0129】なお、本実施形態では、ノイズレベルであると考えられる画素データを使用しないで画素列の和をとることにより、スポット像の位置検出に使用される所定方向に関する解析対象データ分布を作成したが、スポット像の画素データ分布において所定の閾値以上の画素データが所定方向に沿って連続して並ぶ数の最大数の画素から成る複数の画素列の和をとることにより、所定方向に関する解析対象データ分布を作成することもできる。かかる場合には、解析対象データ分布における各画素位置のデータに含まれるノイズ成分が平均化されるので、スポット像の位置を精度良く検出することができ

$$WO = (PA - PS) / (\Delta / 2) \quad \dots (2)$$

$$WE = (PS + \Delta / 2 - PA) / (\Delta / 2) \quad \dots (3)$$

$$PD = WO \cdot PO + WE \cdot PE \quad \dots (4)$$

【0132】以上の(2)～(4)式で算出されるスポット像位置PDの真のスポット像位置からの誤差εBは、図16において実線で示されるようになる。なお、図16においては、比較のために、奇数重心位置の真のスポット像位置からの誤差εO及び偶数重心位置の真のスポット像位置からの誤差εEが点線で示されている。この図16から判るように、(2)～(4)式で算出されるスポット像位置PDは、非常に良い精度で真のスポット像位置と一致する。

【0133】《第2の実施形態》以下、本発明の第2の実施形態を説明する。本実施形態の露光装置は第1の実施形態の露光装置100と同様の構成を有しており、上述の図5におけるデータ分布作成装置34、決定装置35、推定位置算出装置36、スポット像位置算出装置37の作用、すなわち、図14のステップ122～125における処理のみが、第1の実施形態と異なる。そこで、かかる相違点に主に着目して、以下において、本実施形態の説明を行う。なお、本実施形態の説明にあたって、第1の実施形態と同一又は同等の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0134】以下、本実施形態の露光装置100による露光動作を説明する。

【0135】本実施形態においても、第1の実施形態と同様にして、図6のサブルーチン101において、投影光学系PLの波面収差が測定される。この波面収差の測定では、第1の実施形態と同様に、図7に示されるステップ111～113が実行され、測定用レチクルのロード(ステップ111)、波面センサ90の最初の測定位置への移動(ステップ112)及びスポット像の撮像

る。

【0130】また、本実施形態では、奇数重心位置、偶数重心位置、及び平均重心位置のうちで、最も誤差が小さいと考えられる推定位置を求めることにより、スポット像の位置を検出したが、奇数重心位置と偶数重心位置との重み付け平均を算出することにより、スポット像の位置を検出することもできる。すなわち、奇数重心位置の精度の良い範囲では奇数重心位置の重みを高くし、偶数重心位置の精度の良い範囲では偶数重心位置の重みを高くする重み付け平均を算出することにより、スポット像の位置を精度良く検出することができる。

【0131】こうした重み付け平均位置PDとしては、画素幅Δ、奇数重心位置PO、偶数重心位置PE、平均重心位置PA(=(PO+PE)/2)、奇数重心位置PO及び偶数重心位置PEが存在する画素の領域が[PS, PS+Δ]の範囲であるとして、次の(2)～

(4)式を採用することができる。

(ステップ113)が実行される。そして、サブルーチン114において、スポット像の位置検出が行われる。

【0136】サブルーチン114においては、第1の実施形態と同様に、まず、図14のステップ121において、位置検出装置32のデータ分布作成装置34が、撮像データ格納領域41から撮像データを読み出して、最初のスポット像(j=1)が形成されている領域を抽出する。こうして抽出されたスポット像領域SPA_jの例が図17(A)に示されている。

【0137】図14に戻り、次に、ステップ122において、データ分布作成装置34が、X方向の解析対象データ分布JX_p(X)(p=1, …)及びY方向の解析対象データ分布JY_q(Y)(q=1, …)を作成する。かかる解析対象データ分布JX_p(X)、JY_q(Y)の作成にあたり、データ分布作成装置34は、まず、第1の実施形態と同様に、所定の閾値以上の明るさであった画素を抽出する。この結果、図17(A)の画素データ分布ではクロスハッチされた画素及びシングルハッチされた画素の画素データが抽出されたものとする。

【0138】引き続き、データ分布作成装置34は、抽出された画素データについて、X方向に沿って所定の数(例えば、4個)以上連続して並んでいる画素列を抽出する。そして、抽出された画素列における画素データ分布を解析対象データ分布JX_p(X)(p=1, …)とする。図17(A)においては、所定の閾値以上の明るさであった画素が4個以上連続して並んでいる画素列は、X軸と平行なSLX₁軸、SLX₂軸、及びSLX₃軸に沿った画素列である。この結果、図17(B)に示

される SLX_1 軸に沿った5個の画素列の画素データ分布 $JX_1(X)$ 、図17(C)に示される SLX_2 軸に沿った5個の画素列の画素データ分布 $JX_2(X)$ 、及び図17(D)に示される SLX_3 軸に沿った4個の画素列の画素データ分布 $JX_3(X)$ が、解析対象データ分布 $JX_p(X)$ として求められる。また、データ分布作成装置34は、解析対象データ分布 $JX_p(X)$ の場合と同様にして、抽出された画素データについて、Y方向に沿って所定の数(例えば、4個)以上連続して並んでいる画素列を抽出する。そして、抽出された画素列における画素データ分布を解析対象データ分布 $JY_q(Y)$ とする。

【0139】また、データ分布作成装置34は、求められた解析対象データ分布 $JX_p(X)$ それぞれの画素数 NX_p 、及び、求められた解析対象データ分布 $JY_q(Y)$ それぞれの画素数 NY_q を求める。例えば、図17(B)～図17(D)における画素数 NX_1 、 NX_2 、 NX_3 は、「5、5、4」である。

【0140】そして、データ分布作成装置34は、求められた解析対象データ分布 $JX_p(X)$ 、 $JY_q(Y)$ 、並びに最大数 NX_p 、 NY_q をデータ分布格納領域42に格納する。

【0141】図14に戻り、次いで、ステップ123において、位置検出装置32の決定装置35が、データ分布格納領域42から最大数 NX_p 、 NY_q を読み出し、スポット像のX位置検出において使用する、解析対象データ分布 $JX_p(X)$ それぞれの解析範囲を規定する1つの奇数 $NX1_p$ 及び1つの偶数 $NX2_p$ を決定する。また、決定装置35は、スポット像のY位置検出において使用する、解析対象データ分布 $JY_q(Y)$ それぞれの解析範囲を規定する1つの奇数 $NY1_q$ 及び1つの偶数 $NY2_q$ を決定する。

【0142】ここで、画素数 NX_p が奇数であったときには、数 $NX1_p$ を数 NX_p に決定するとともに、数 $NX2_p$ を数 $(NX_p - 1)$ に決定する。一方、画素数 NX_p が偶数であったときには、数 $NX2_p$ を数 NX_p に決定するとともに、数 $NX1_p$ を数 $(NX_p - 1)$ に決定する。なお、図17(B)に示される解析対象データ分布 $JX_1(X)$ では、最大数 $NX_1 = 5$ なので、 $NX1_1 = 5$ 及び $NX2_1 = 4$ と決定される。また、図17(C)に示される解析対象データ分布 $JX_2(X)$ では、最大数 $NX_2 = 5$ なので、 $NX1_2 = 5$ 及び $NX2_2 = 4$ と決定される。図17(D)に示される解析対象データ分布 $JX_3(X)$ では、最大数 $NX_3 = 4$ なので、 $NX1_3 = 3$ 及び $NX2_3 = 4$ と決定される。

【0143】また、画素数 NY_q が奇数であったときには、数 $NY1_q$ を数 NY_q に決定するとともに、数 $NY2_q$ を数 $(NY_q - 1)$ に決定する。一方、画素数 NY_q が偶数であったときには、数 $NY2_q$ を数 NY_q に決定するとともに、数 $NY1_q$ を数 $(NY_q - 1)$ に決定する。

【0144】そして、決定装置35が、決定された数 $NX1_p$ 、 $NX2_p$ 、 $NY1_q$ 、 $NY2_q$ を解析幅格納領域43に格納する。

【0145】図14に戻り、次に、ステップ124において、位置検出装置32の推定位置算出装置36が、データ分布格納領域42から解析対象データ分布 $JX_p(X)$ 、 $JY_q(Y)$ を読み出すとともに、解析幅格納領域43から数 $NX1_p$ 、 $NX2_p$ 、 $NY1_q$ 、 $NY2_q$ を読み出す。引き続き、推定位置算出装置36は、解析対象データ分布 $JX_p(X)$ 及び数 $NX1_p$ に基づいて、第1の実施形態の場合と同様にして、重心法により解析対象データ分布 $JX_p(X)$ ごとの第1推定X位置 $X1_p$ を算出するとともに、解析対象データ分布 $JX_p(X)$ 及び数 $NX2_p$ に基づいて、重心法により第2推定X位置 $X2_p$ を算出する。

【0146】また、推定位置算出装置36は、解析対象データ分布 $JX_p(X)$ の場合と同様にして、解析対象データ分布 $JY_q(Y)$ 及び数 $NY1_q$ に基づいて、重心法により第1推定Y位置 $Y1_q$ を算出するとともに、解析対象データ分布 $JY_q(Y)$ 及び数 $NY2_q$ に基づいて、重心法により解析対象データ分布 $JY_q(Y)$ ごとの第2推定Y位置 $Y2_q$ を算出する。

【0147】そして、推定位置算出装置36は、第1推定X位置 $X1_p$ 、第2推定X位置 $X2_p$ 、第1推定Y位置 $Y1_q$ 、及び第2推定Y位置 $Y2_q$ 、並びに数 $NX1_p$ 、 $NX2_p$ 、 $NY1_q$ 、 $NY2_q$ を推定位置格納領域44に格納する。

【0148】図14に戻り、次に、ステップ125において、位置検出装置32のスポット像位置算出装置37は、推定位置格納領域44から第1推定X位置 $X1_p$ 、第2推定X位置 $X2_p$ 、第1推定Y位置 $Y1_q$ 、及び第2推定Y位置 $Y2_q$ 、並びに $NX1_p$ 、 $NX2_p$ 、 $NY1_q$ 、 $NY2_q$ を読み出し、スポット像のX位置及びY位置を算出する。かかるスポット像のX位置及びY位置の算出にあたって、スポット像位置算出装置37は、まず、解析対象データ分布 $JX_p(X)$ ごとの、第1推定X位置 $X1_p$ 及び第2推定X位置 $X2_p$ 並びに数 $NX1_p$ 、 $NX2_p$ に基づいて、第1推定X位置 $X1_p$ 、第2推定X位置 $X2_p$ 、及び平均推定X位置 $XA_p = (X1_p + X2_p) / 2$ のなかで、どのX推定位置が最も誤差が少なくなると思われるものであるかを判定する。そして、最も誤差が少なくなると思われるX推定位置を、解析対象データ分布 $JX_p(X)$ ごとの個別推定X位置 $X0_p$ として求める。そして、解析対象データ分布 $JX_p(X)$ それぞれの画素数や画素データの値等に応じて、予めシミュレーション等によって求められた個別推定X位置 $X0_p$ それぞれの統計的な信頼度を重みとして個別推定X位置 $X0_p$ の重み付け平均を算出することにより、スポット像のX位置を求める。

【0149】引き続き、スポット像位置算出装置37

は、第1推定Y位置 $Y1_q$ 及び第2推定Y位置 $Y2_q$ 並びに数 $NY1_q$ 、 $NY2_q$ に基づいて、スポット像のX位置の場合と同様にして、各個別推定Y位置 $Y0_q$ を求める。そして、個別推定Y位置 $Y0_q$ それぞれの統計的な信頼度を重みとして個別推定Y位置 $Y0_q$ の重み付け平均を算出することにより、スポット像のY位置を求める。

【0150】スポット像位置算出装置37は、こうして求められたスポット像のX位置及びY位置をスポット像位置格納領域45に格納する。

【0151】以下、第1の実施形態の場合と同様にして、全てのスポット像の位置を検出し、波面収差を測定する。引き続き、必要に応じて波面収差を調整して、投影光学系PLの波面収差を低減させる。そして、波面収差が小さく調整された投影光学系PLを使用して、ウエハWを露光することにより、レチクルRに形成されたパターンをウエハW表面に転写する。

【0152】以上説明したように、本実施形態によれば、複数の解析対象データ分布それぞれについて、奇数及び偶数からなる1対の数それぞれで定められる解析幅で、解析対象データ分布について重心法を適用し、スポット像の推定位置として、推定解析幅と奇数を使用したときの奇数重心位置、及び、解析幅と偶数を使用したときの偶数重心位置を算出する。そして、奇数重心位置及び偶数重心位置に基づいて、重心法による誤差発生を性質を考慮して、解析対象データ分布それぞれにおける個別推定位置を求める。この後、個別推定値それぞれの統計的な信頼度に基づいて、個別推定値の重み付け平均値を算出することにより、スポット像を求める。したがって、スポット像の画素数が少ない場合であっても、スポット像の位置を迅速かつ精度良く検出することができる。

【0153】また、第1の実施形態と同様に、スポット像の位置検出に使用される解析対象データ分布の作成にあたって、ノイズレベルであると考えられる画素データを使用しないので、スポット像の位置を精度良く検出することができる。

【0154】また、信号成分が含まれると考えられるデータを最大限使用して、解析対象データ分布を作成しているので、スポット像の位置を精度良く検出することができる。

【0155】また、奇数重心位置、偶数重心位置、及び平均重心位置のうちで、最も誤差が小さいと考えられる推定位置を求めることにより、スポット像の位置を検出しているので、スポット像の位置を迅速かつ精度良く検出することができる。

【0156】また、精度良く求められたスポット像位置を用いて投影光学系PLの波面収差を算出するので、投影光学系PLの波面収差を精度良く求めることができる。

【0157】また、精度良く求められた投影光学系PLの波面収差に基づいて、投影光学系PLの収差を調整し、十分に諸収差が低減された投影光学系PLによりレチクルRに形成された所定のパターンがウエハW表面に投影されるので、所定のパターンをウエハWに精度良く転写することができる。

【0158】なお、本実施形態では、ノイズレベルであると考えられる画素データを使用しないで画素列の和をとることにより、スポット像の位置検出に使用される所定方向に関する解析対象データ分布を作成したが、第1の実施形態の場合と同様に、スポット像の画素データ分布において所定の閾値以上の画素データが所定方向に沿って連続して並ぶ数の最大数の画素から成る複数の画素列の和をとることにより、所定方向に関する解析対象データ分布を作成することもできる。

【0159】また、本実施形態では、奇数重心位置、偶数重心位置、及び平均重心位置のうちで、最も誤差が小さいと考えられる推定位置を求めることにより、個別推定値位置を検出したが、奇数重心位置と偶数重心位置との重み付け平均を算出することにより、スポット像の位置を検出することもできる。すなわち、奇数重心位置の精度の良い範囲では奇数重心位置の重みを高くし、偶数重心位置の精度の良い範囲では偶数重心位置の重みを高くする重み付け平均を算出することにより、スポット像の位置を精度良く検出することができる。

【0160】なお、上記の各実施形態では、奇数重心位置及び偶数重心位置を求めるために、1つの奇数及び1つの偶数を使用した。2以上の奇数を使用したり、2以上の偶数を使用したりすることもできる。

【0161】また、上記の各実施形態では、解析対象データ分布から奇数及び偶数に応じた2つの推定値を求めるのにあたって重心法を使用した。他のアルゴリズムを使用することも可能である。すなわち、奇数及び偶数に応じた2つの推定値が既知の関係を有することになるアルゴリズムであれば、重心法に代えて使用することができる。

【0162】上記の各実施形態では、撮像されたスポット像から重心法に使用する奇数及び偶数を決定したが、スポット像の大きさが予め推定できる場合には、その大きさに応じて、重心法に使用する奇数及び偶数を決定しておくこともできる。かかる場合には、上記の各実施形態における決定装置35を省略することができる。

【0163】また、上記の各実施形態では、測定用レチクルRTにおける開口パターンを9つとしたが、所望の波面収差の測定精度に応じて、数を増減することが可能である。また、マイクロレンズアレイ94におけるマイクロレンズ94aの配列数や配列態様も、所望の波面収差の測定精度に応じて変更することが可能である。

【0164】また、上記の実施形態では、露光にあたっては波面収差計測装置70を露光装置本体60から切り

離したが、波面収差計測装置70を露光装置本体60に装着したままで露光してもよいことは勿論である。

【0165】また、上記の実施形態では、走査型露光装置の場合を説明したが、本発明は、投影光学系を備える露光装置であれば、ステップ・アンド・リピート機、ステップ・アンド・スキャン機、ステップ・アンド・ステッチング機を問わず適用することができる。

【0166】また、上記実施形態では、露光装置における投影光学系の収差計測に本発明を適用したが、露光装置に限らず、他の種類の装置における結像光学系の諸収差の計測にも本発明を適用することができる。

【0167】さらに、光学系の収差計測以外であっても、例えば反射鏡の形状等の様々な光学系の光学特性の測定にも本発明を適用することができる。

【0168】《デバイスの製造》次に、上記の実施形態の露光装置を使用したデバイスの製造について説明する。

【0169】図18は、デバイス(ICやLSI等の半導体チップ、液晶パネル、CCD、薄膜磁気ヘッド、マイクロマシン等)の生産のフローチャートが示されている。図18に示されるように、まず、ステップ201(設計ステップ)において、デバイスの機能設計(例えば、半導体デバイスの回路設計等)を行い、その機能を実現するためのパターン設計を行う。引き続き、ステップ202(マスク製作ステップ)において、設計した回路パターンを形成したマスクを製作する。一方、ステップ203(ウエハ製造ステップ)において、シリコン等の材料を用いてウエハを製造する。

【0170】次に、ステップ204(ウエハ処理ステップ)において、ステップ201～ステップ203で用意したマスクとウエハを使用して、後述するように、リソグラフィ技術によってウエハ上に実際の回路等を形成する。次いで、ステップ205(デバイス組立ステップ)において、ステップ204において処理されたウエハを用いてチップ化する。このステップ205には、アセンブリ工程(ダイシング、ボンディング)パッケージング工程(チップ封入)等の工程が含まれる。

【0171】最後に、ステップ206(検査ステップ)において、ステップ205で作製されたデバイスの動作確認テスト、耐久性テスト等の検査を行う。こうした工程を経た後にデバイスが完成し、これが出荷される。

【0172】図19には、半導体デバイスの場合における、上記ステップ204の詳細なフロー例が示されている。図19において、ステップ211(酸化ステップ)においてはウエハの表面を酸化させる。ステップ212(CVDステップ)においてはウエハ表面に絶縁膜を形成する。ステップ213(電極形成ステップ)においてはウエハ上に電極を蒸着によって形成する。ステップ214(イオン打込みステップ)においてはウエハにイオンを打ち込む。以上のステップ211～ステップ214

それぞれは、ウエハプロセスの各段階の前処理工程を構成しており、各段階において必要な処理に応じて選択されて実行される。

【0173】ウエハプロセスの各段階において、前処理工程が終了すると、以下のようにして後処理工程が実行される。この後処理工程では、まず、ステップ215(レジスト形成ステップ)において、ウエハに感光剤を塗布し、引き続き、ステップ216(露光ステップ)において、上記で説明した実施形態の露光装置によってマスクの回路パターンをウエハに焼付露光する。次に、ステップ217(現像ステップ)においては露光されたウエハを現像し、引き続き、ステップ218(エッチングステップ)において、レジストが残存している部分以外の部分の露出部材をエッチングにより取り去る。そして、ステップ219(レジスト除去ステップ)において、エッチングが済んで不要となったレジストを取り除く。

【0174】これらの前処理工程と後処理工程とを繰り返すことによって、ウエハ上に多重に回路パターンが形成される。

【0175】以上のようにして、精度良く微細なパターンが形成されたデバイスが製造される。

【0176】

【発明の効果】以上、詳細に説明したように、本発明の位置検出方法によれば、スポット像の画素数が少ない場合であっても、スポット像の位置を迅速かつ精度良く検出することができる。

【0177】また、本発明の位置検出装置によれば、本発明の位置検出方法を使用してスポット像の位置を検出するので、スポット像の画素数が少ない場合であっても、スポット像の位置を迅速かつ精度良く検出することができる。

【0178】また、本発明の光学特性測定方法によれば、被検光学系の光学特性を反映した複数のスポット像の形成位置を本発明の位置検出方法により検出し、検出された複数のパターンの位置に基づいて被検光学系の光学特性を測定するので、被検光学系の光学特性を迅速かつ精度良く検出することができる。

【0179】また、本発明の光学特性測定装置によれば、本発明の光学特性測定方法を使用して被検光学系の光学特性を測定するので、被検光学系の光学特性を迅速かつ精度良く検出することができる。

【0180】また、本発明の露光装置によれば、投影光学系の光学特性を測定する本発明の光学特性測定装置を備えるので、本発明の光学特性測定装置により精度良く光学特性が測定され、光学特性が良好に調整されていることが保証された投影光学系を使用して、所定のパターンを基板に転写することができる。

【0181】また、本発明のデバイス製造方法によれば、リソグラフィ工程において、本発明の露光方法を採

用して所定のパターンを基板に転写するので、精度良く微細なパターンが形成されたデバイスを製造することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施形態に係る露光装置の構成を概略的に示す図である。

【図2】図1の波面センサの構成を概略的に示す図である。

【図3】図2の標示板の表面状態を説明するための図である。

【図4】図4(A)及び図4(B)は、図2のマイクロレンズアレイの構成を示す図である。

【図5】図1の主制御系の構成を示すブロック図である。

【図6】図1の装置による露光動作における処理を説明するためのフローチャートである。

【図7】図6の収差測定サブルーチンにおける処理を説明するためのフローチャートである。

【図8】測定用レチクルに形成された測定用パターンの例を示す図である。

【図9】波面収差測定時における光学配置を説明するための図である。

【図10】図10(A)及び図10(B)は、第1の実施形態におけるスポット像位置の検出の原理を説明するための図(その1)である。

【図11】図11(A)及び図11(B)は、第1の実施形態におけるスポット像位置の検出の原理を説明するための図(その2)である。

【図12】図12(A)及び図12(B)は、第1の実施形態におけるスポット像位置の検出の原理を説明するための図(その3)である。

【図13】第1の実施形態におけるスポット像位置の検出の原理を説明するための図(その4)である。

【図14】図7のスポット像位置検出サブルーチンにおける処理を説明するためのフローチャートである。

【図15】図15(A)及び図15(B)は、第1の実施形態における撮像されたスポット像及び解析対象データ分布を説明するための図である。

【図16】変形例を説明するための図である。

【図17】図17(A)～図17(D)は、第2の実施形態における撮像されたスポット像及び解析対象データ分布を説明するための図である。

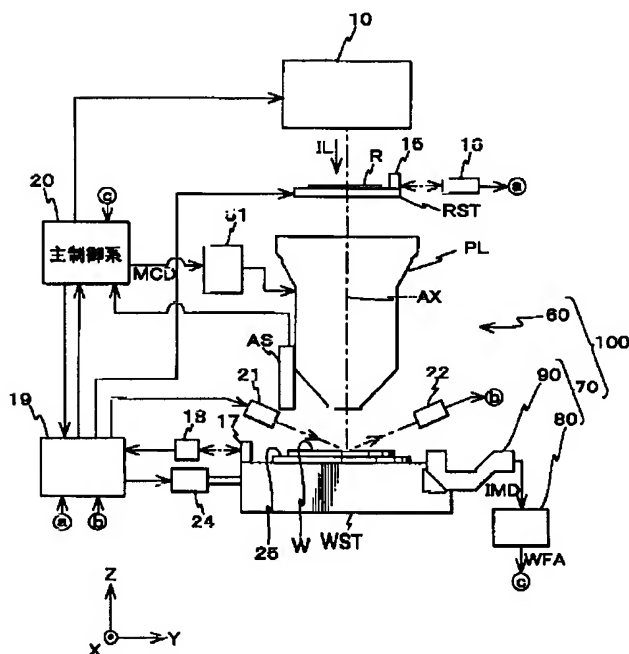
【図18】第1及び第2の実施形態の露光装置を用いたデバイス製造方法を説明するためのフローチャートである。

【図19】図18のウエハ処理ステップにおける処理のフローチャートである。

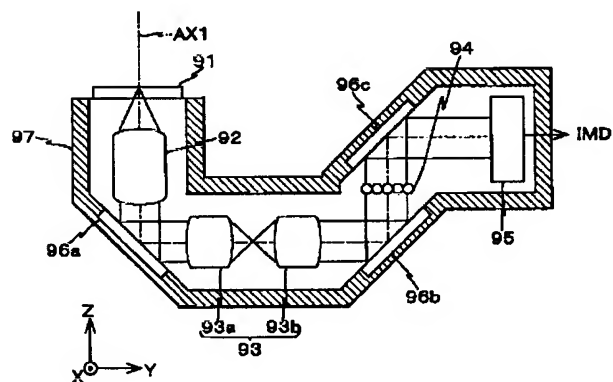
【符号の説明】

32…位置検出装置、33…波面収差算出装置(光学特性算出装置)、34…データ分布作成装置(作成装置)、35…決定装置、36…推定位置算出装置、37…スポット像位置算出装置、60…露光装置本体、90…波面収差測定装置(光学特性測定装置)、94…マイクロレンズアレイ(波面分割素子)、94a…マイクロレンズ(レンズ要素)、95…CCD(撮像装置)、PL…投影光学系(被検光学系)、W…ウエハ(基板)。

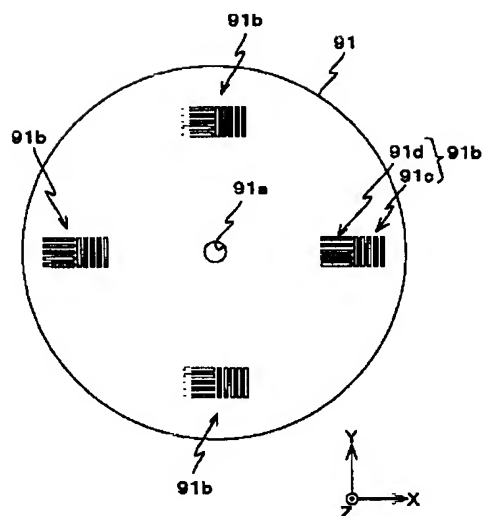
【図1】



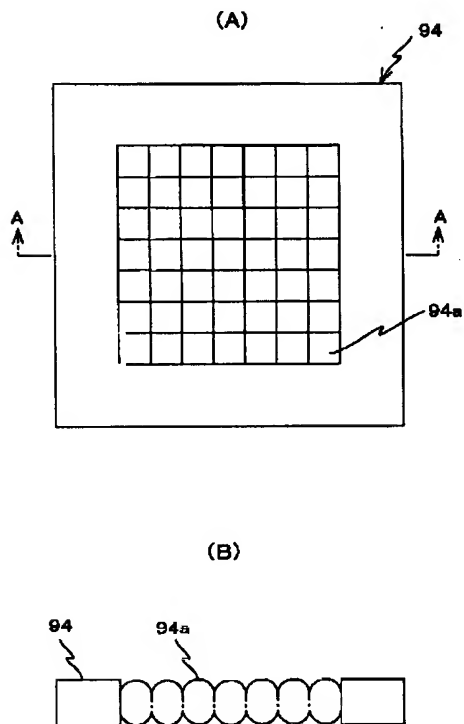
【図2】



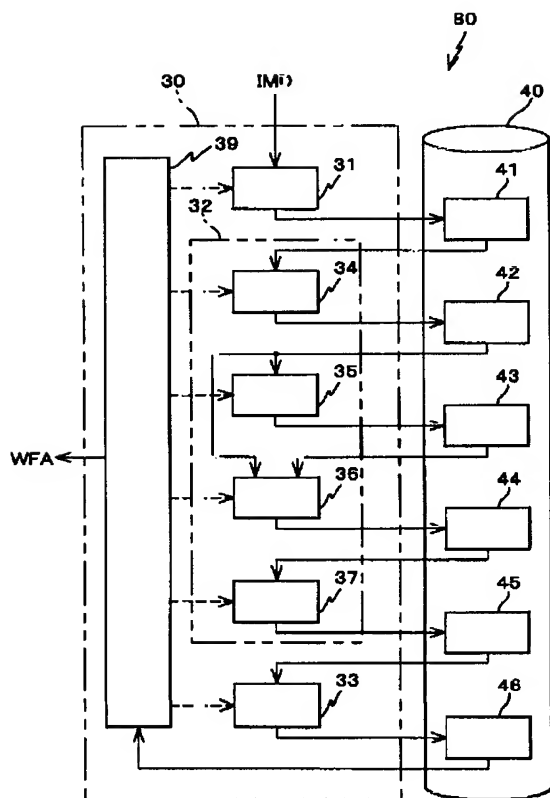
【図3】



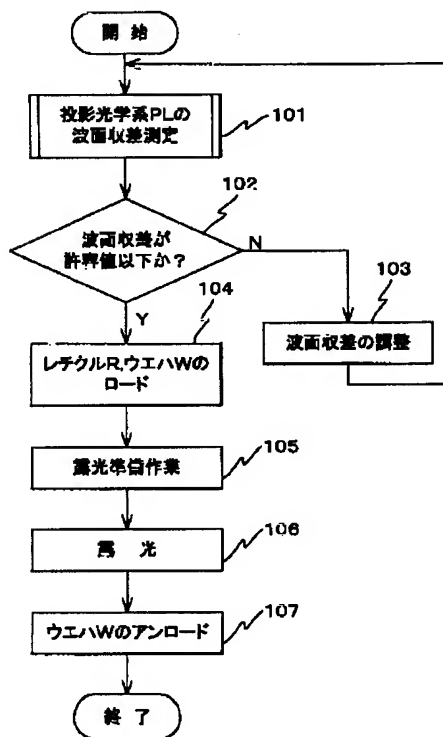
【図4】



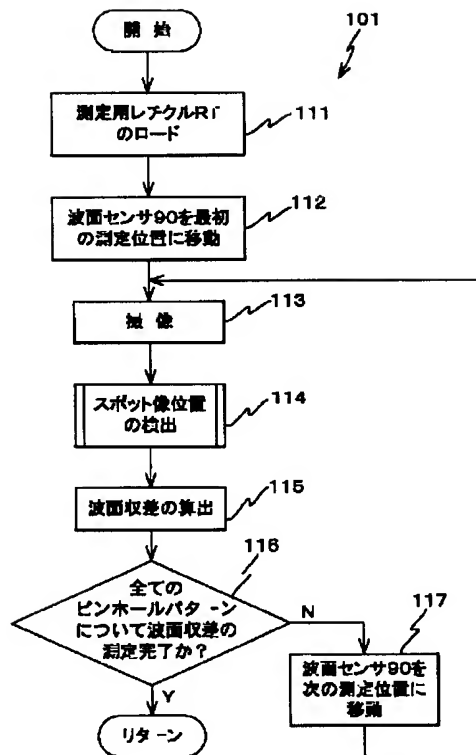
【図5】



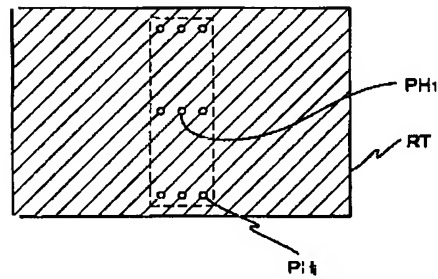
【図6】



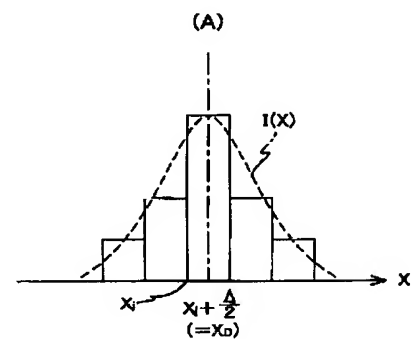
【図7】



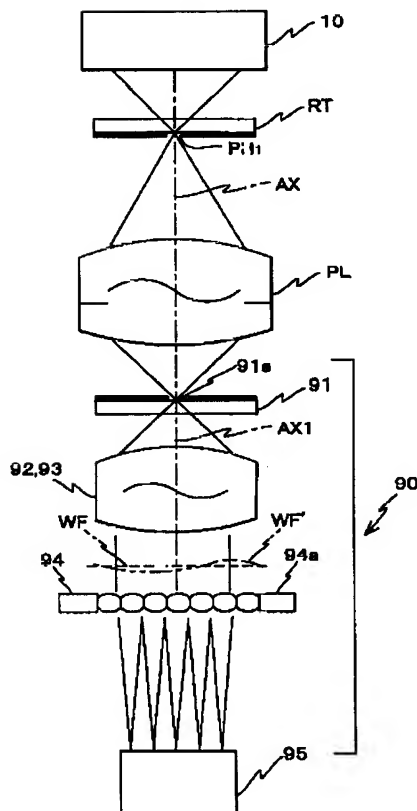
【図8】



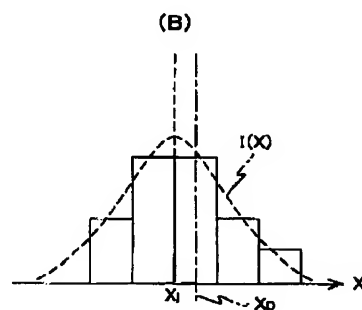
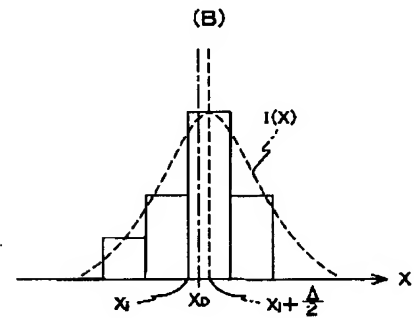
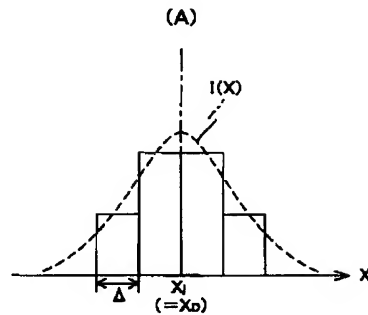
【図 1 1】



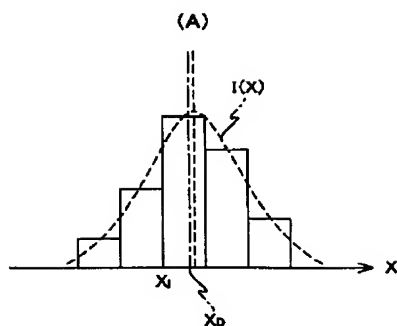
【図9】



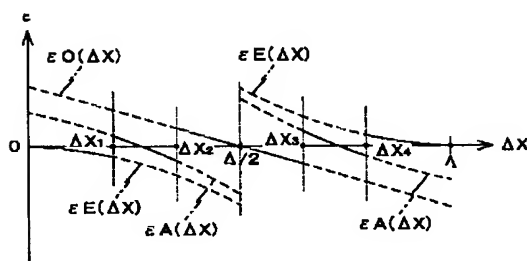
【図10】



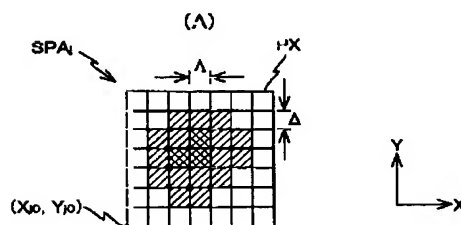
【図12】



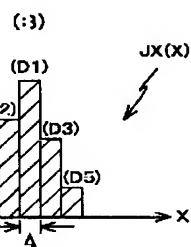
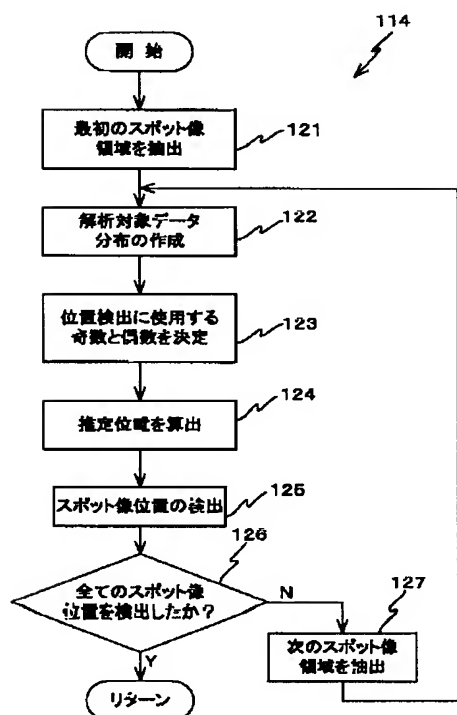
【図13】



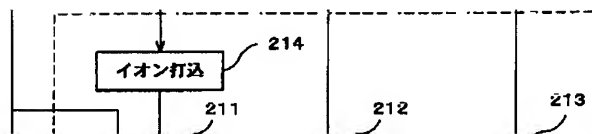
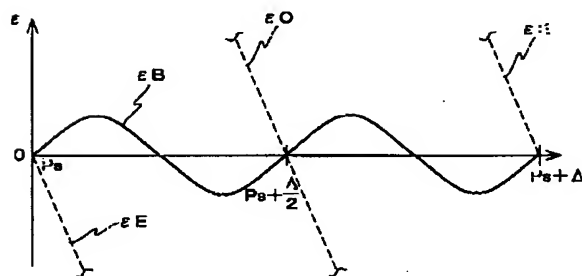
【図15】



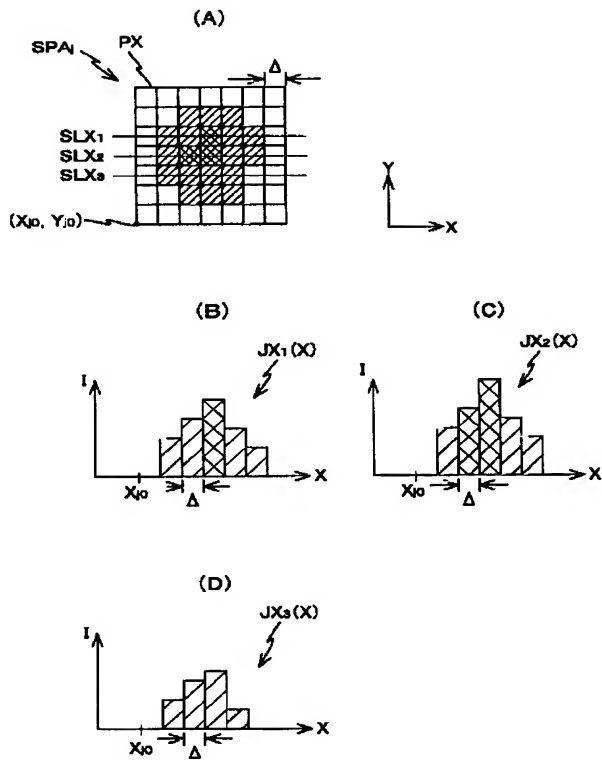
【図14】



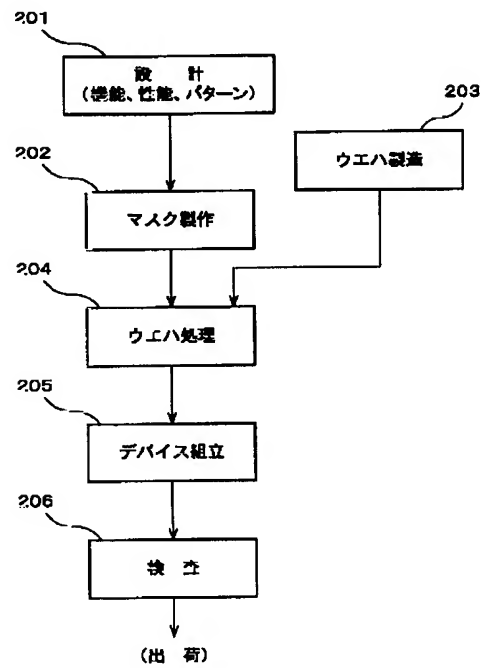
【図16】



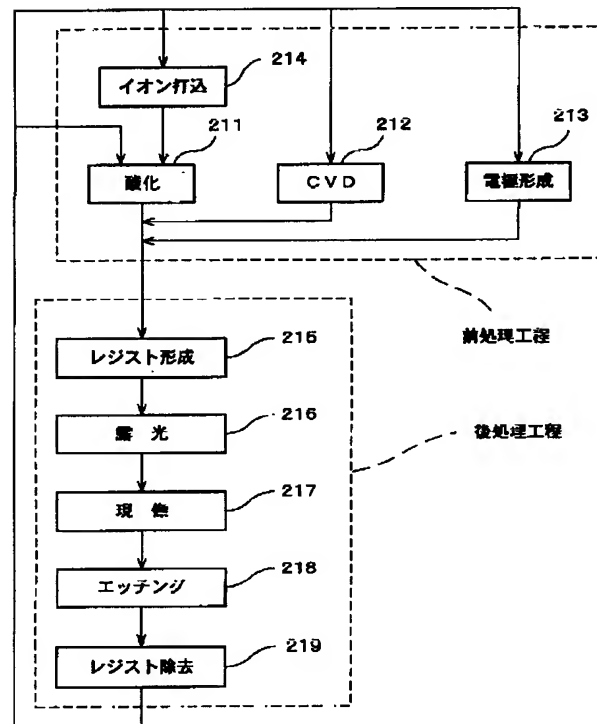
【図17】



【図18】



【図19】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2F065 AA03 AA17 CC17 CC21 DD03
DD06 FF04 FF26 FF52 GG04
HH03 JJ03 JJ26 LL03 LL07
LL10 LL20 LL25 LL59 MM03
PP12 QQ18 QQ24 QQ42 QQ43
QQ45 TT02 UU05 UU07
2G086 HH06
5F046 AA25 BA04 BA05 CB12 CB17
CB25 CC01 CC03 CC05 CC15
DA13 DA14 DB01 DB11 DC12